



Rita Cristina Carvalho Cavique Santos

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Modelação física da interacção onda-estrutura em fundo arenoso

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientadora: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,
Professora Doutora, FCT-UNL
Co-orientador: Francisco Eduardo da Ponte Sancho,
Investigador Auxiliar, LNEC

Júri:

Presidente: Doutor Carlos Chastre Rodrigues

Vogais: Doutor Luís Gil (Arguente)

Doutora Maria da Graça Neves (Orientadora)



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio de 2015



Rita Cristina Carvalho Cavique Santos

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Modelação física da interacção onda-estrutura em fundo arenoso

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientadora: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,
Professora Doutora, FCT-UNL
Co-orientador: Francisco Eduardo da Ponte Sancho,
Investigador Auxiliar, LNEC



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio de 2015

“Copyright” Rita Cristina Carvalho Cavique Santos, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com inúmeros incentivos, apoios e oportunidades. A limitação do espaço desta secção não me permite agradecer a todas as pessoas que estiveram presentes ao longo do meu percurso académico. Deste modo, deixo o meu sincero agradecimento aos que mais contribuíram para esta fase final do mestrado e sem os quais não teria sido possível a concretização deste estudo.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), por me ter acolhido e ter dado a oportunidade de realizar um estágio no âmbito desta dissertação.

À Professora Maria da Graça Neves, minha orientadora, pela simpatia, estímulo, ajuda e inestimável disponibilidade que sempre demonstrou ao longo destes 7 meses mas, sobretudo, pelo conhecimento e rigor científico que me transmitiu. Agradeço também a oportunidade que me deu de realizar esta dissertação no Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC.

Ao Professor Francisco Sancho, meu co-orientador, pela disponibilidade e, principalmente, pelo formalismo e conhecimento que me transmitiu ao longo de todo o trabalho.

À Eng.^a Rute Lemos pela ajuda, disponibilidade e conhecimento que me transmitiu sobre a técnica da fotogrametria.

À Eng.^a Ana Mendonça pela ajuda que me deu no aperfeiçoamento de figuras em MATLAB.

À Joana Simão e ao André Ramos pelo apoio importante que me deram durante a realização dos ensaios.

Ao meu colega, João Dias, que presenciou todas as fases desta dissertação, pela simpatia e ótimo ambiente que proporcionou na sala de estagiários.

Aos mais recentes colegas, Inês Lourenço, André Matos, Fábio Madeira e Jorge Silva, que acompanharam o fim deste estudo, mantendo o ambiente e companheirismo que já se vivia.

Ao Pedro Mota, pela ajuda que me deu na adaptação da figura que contém a trajectória de partículas de água.

Ao meu colega de faculdade, Nuno Malfeito, pela indicação que me deu da disponibilidade da Professora Maria da Graça Neves para orientar esta tese.

Ao meu namorado, João, por todo o apoio e confiança depositada em mim e pela dedicação que demonstrou durante este período.

Finalmente, não menos importante, agradeço aos meus pais pelo incondicional apoio que me deram e a quem dedico este trabalho. Agradeço em particular ao meu Pai pelas opiniões e conversas que foram para mim uma grande ajuda na conclusão desta dissertação.

RESUMO

Nesta dissertação estudou-se, em modelo físico reduzido, a interacção da agitação marítima com uma estrutura marítima submersa, composta por blocos, assente em solo arenoso e assente em enrocamento. A estrutura, no protótipo, é composta por três módulos destacados e submersos, constituídas por blocos, situados na Praia de Santa Maria del Mar em Cadiz, Espanha, para assegurar a protecção costeira contra a erosão. No entanto, esta função não foi cumprida já que os blocos começaram a assentar e afundar-se no solo logo após a sua colocação.

Com o objectivo de avaliar a estabilidade dos blocos submersos e a alteração do perfil do fundo em torno da estrutura submersa, para diferentes condições de agitação, para dois níveis de maré (baixa-mar e preia-mar) e com a estrutura assente em dois materiais diferentes, realizaram-se ensaios em modelo físico reduzido num tanque de ondas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Iniciou-se a modelação física do caso de estudo considerando as escalas necessárias a aplicar ao modelo, no que respeita às dimensões da estrutura modular, ao material sedimentar e sua granulometria, aos níveis de maré e condições de agitação a ensaiar. Definidos os parâmetros mencionados, procedeu-se à construção do modelo e à realização dos ensaios, onde se quantificaram a alteração do fundo e o deslocamento dos blocos através do levantamento de cotas após o ensaio de cada condição de agitação. Os levantamentos efectuados foram realizados por dois métodos diferentes, com recurso a um hidrómetro e através de fotogrametria, de forma a testar a aplicabilidade deste último método em situações de fundo móvel.

Através dos resultados obtidos pelos levantamentos, verificou-se que a condição de agitação correspondente a um clima de tempestade foi a que mais influenciou o comportamento dos blocos, que afundaram cerca de 0,6 m (à escala do protótipo). Relativamente às alterações do fundo, ao longo dos ensaios verificou-se um fenómeno de erosão inicial a sotamar da estrutura até o fundo atingir o seu equilíbrio na presença da estrutura submersa sujeita a condições de agitação energéticas, havendo posteriormente ligeiras deposições. Como expectável, em termos de maré, as diferenças de variações de cota do fundo foram mais perceptíveis em baixa-mar do que em preia-mar, já que com um nível de maré superior a estrutura interfere menos com a agitação marítima e consequentemente com o fundo. Relativamente ao material de fundo, a colocação de gravilha em vez de areia, sob a estrutura e a sotamar desta, limita consideravelmente quer as alterações registadas no fundo quer os assentamentos da estrutura.

Palavras-Chave: Quebra-mar destacado submerso, modelação física, agitação marítima, erosão, assentamento.

ABSTRACT

This work aims at describing the interaction, in a small-scale physical model, between the sea waves and a submerged maritime structure. This structure has concrete blocks placed either on a sandy seabed or on gravel. The prototype structure has three submerged breakwater modules of concrete blocks, and was constructed in the Praia de Santa Maria del Mar in Cadiz, Spain, for coastal protection against coastal erosion phenomena. However, the structure was not able to fulfil its function as it started to settle and sink in the seabed just after being placed on the sandy bottom.

In order to evaluate the stability of the submerged blocks and verify the seabed profile around the submerged structure, a study was carried out in one of the wave basins of the Department of Hydraulics and Environment of the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC), using a small-scale physical model. The tests considered different wave conditions, low tide and high tide and two different seabed materials, in order to verify the influence of each change on the seabed bathymetry and on the stability of the submerged structure.

The definition of the small-scale physical model took into consideration the requirement concerning the scales of the modular structure, the bed material (in this case, pumice stone), the tidal levels and the wave conditions. After setting the conditions for each test, experiments were carried out in order to evaluate the changes that occurred in the seabed and in the displacement of the blocks. The surveys were performed using two different methods, an hydrometer and a photogrammetric method, making it possible to test the applicability of the latter method in movable seabed situations.

Based on the results obtained, it was possible to verify that the wave conditions corresponding to a stormy weather, i.e. with large significant wave height, were the most influencing conditions to sink the blocks, which attained a depth of 0.6 m at the prototype scale. As for the changes that occurred in the seabed, one concludes that initial scouring took place shoreward of the submerged structure, until the seabed reached its equilibrium, with a slight deposition phenomena occurring afterwards. As expected, concerning the tidal influence, the major erosion and sediments mobility occurred in low tide conditions, because in this case the structure has a greater interference with the sea waves than in the situation of high-tide. It was possible to limit the bathymetric changes and the structure displacements by placing a granular material (gravel) under the structure and shoreward of it, where previously most of the scour occurred.

Keywords: Submerged breakwater, physical modeling, sea-wave, scour, sinking.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objectivo do estudo	2
1.2	Estrutura da dissertação.....	3
2.	ENQUADRAMENTO TEÓRICO	5
2.1	Características das ondas de superfície	5
2.2	Transporte de sedimentos.....	7
2.3	Teoria da Semelhança	8
2.4	Escala	9
2.5	Fotogrametria	14
3.	CASO DE ESTUDO	17
3.1	Descrição do caso de estudo	17
3.2	Condições de agitação	19
4.	MODELAÇÃO FÍSICA DO CASO DE ESTUDO.....	21
4.1	Objectivo dos ensaios	21
4.2	Escala do modelo	21
4.3	Caracterização do movimento.....	25
4.4	Instalação experimental e instrumentação.....	26
4.5	Metodologia de ensaios.....	31
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1	Condições de agitação	33
5.2	Levantamento de cotas	35
5.2.1	Tratamento de imagens - Fotogrametria	35
5.2.2	Resultados obtidos por fotogrametria	38
5.2.3	Resultados obtidos manualmente.....	44
5.3	Análise comparativa entre resultados de levantamentos por fotogrametria e manualmente	48
5.4	Interpretação da evolução da erosão e afundamento dos blocos	58
5.5	Comparação dos resultados obtidos no modelo e no protótipo.....	60
5.6	Discussão de Resultados	61
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	67

BIBLIOGRAFIA.....	71
ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Parâmetros básicos de uma onda de superfície (adaptação de Silva, 2009) ..	5
Figura 2.2: Trajectória de partículas de água à superfície e em profundidade (adaptação de Dean, 1991)	6
Figura 2.3: Alvo de calibração	15
Figura 3.1: Localização da área em estudo (fonte: Google Earth)	17
Figura 3.2: Esquema indicativo da localização das estruturas modulares	18
Figura 3.3: Geometria da secção transversal no protótipo	18
Figura 4.1: Comparação de valores do Número de Shields em Baixa-mar.....	26
Figura 4.2: Comparação de valores do Número de Shields em Preia-mar	26
Figura 4.3: Tanque finalizado	27
Figura 4.4: Batedor (esquerda), localização do batedor e das sondas (direita)	27
Figura 4.6: Hidrómetro utilizado no levantamento de cotas.....	28
Figura 4.5: Câmaras fotográficas colocadas no suporte metálico	28
Figura 4.7: Tanque com sedimento devidamente colocado	28
Figura 4.8: Construção e pintura dos blocos.....	29
Figura 4.9: Estrutura 1 e 2.....	29
Figura 4.10: Estrutura 3.....	29
Figura 4.11: Desenho esquemático do perfil do tanque	30
Figura 4.12: Hidrómetro utilizado na verificação do nível de água do tanque	32
Figura 4.13: Levantamento do fundo com fotogrametria e manualmente	32
Figura 5.1: Sobreposição das alturas significativas de onda registadas pelas sondas próximas da estrutura e pela sonda próxima do batedor.....	33
Figura 5.2: Sobreposição das alturas significativas de onda registadas pelas sondas próximas da estrutura e pela sonda próxima do batedor.....	34
Figura 5.3: Par de imagens com alvo de calibração (emerso).....	35
Figura 5.4: Selecção dos pontos correspondentes aos cantos internos do alvo de calibração	36
Figura 5.5: Reconstrução de um par de imagens submersas	36
Figura 5.6: Identificação do ponto de referência	37

Figura 5.7: Cota mínima do fundo registada por fotogrametria nos ensaios do grupo 1 (Baixa-mar)	39
Figura 5.8: Cota mínima do fundo registada por fotogrametria nos ensaios do grupo 2 (Preia-mar)	39
Figura 5.9: Cota mínima do fundo registada por fotogrametria nos ensaios do grupo 3 (Baixa-mar e gravilha)	40
Figura 5.10: Superfície inicial (esquerda) e final (direita) do fundo do Grupo 1	41
Figura 5.11: Superfície inicial (esquerda) e final (direita) do fundo do Grupo 2	41
Figura 5.12: Superfície inicial (esquerda) e final (direita) do fundo do Grupo 3	41
Figura 5.13: Valores de cota registados por fotogrametria do Bloco C ao longo do grupo 1 (Baixa-mar)	43
Figura 5.14: Valores de cota registados por fotogrametria do Bloco C ao longo do grupo 2 (Preia-mar)	43
Figura 5.15: Valores de cota registados por fotogrametria do Bloco C ao longo do grupo 3 (Baixa-mar e gravilha)	43
Figura 5.16: Cota mínima do fundo registada manualmente no grupo 1 (Baixa-mar)	45
Figura 5.17: Cota mínima do fundo registada manualmente no grupo 2 (Preia-mar)	46
Figura 5.18: Cota mínima do fundo registada manualmente no grupo 3 (Baixa-mar e gravilha)	46
Figura 5.19: Valores de cota registados manualmente no Bloco C ao longo do grupo 1 (Baixa-mar)	47
Figura 5.20: Valores de cota registados manualmente no Bloco C ao longo do grupo 2 (Preia-mar)	47
Figura 5.21: Valores de cota registados manualmente no Bloco C ao longo do grupo 3 (Baixa-mar e gravilha)	47
Figura 5.22: Localização em planta dos pontos correspondentes ao zmin de cada ensaio (Fotogrametria)	48
Figura 5.23: Localização em planta dos pontos correspondentes ao zmin de cada ensaio (Manual)	49
Figura 5.24 : Profundidades do fundo ao longo do grupo 1, nos pontos de coordenadas (x, y) correspondentes à profundidade máxima na medição manual	50
Figura 5.25: Reconstrução 6, após dois ensaios com $T_p=1,34$ s e $H_s=2,5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 7, após dois ensaios com $T_p=1,34$ s e $H_s=5$ cm (Direita)	51

Figura 5.26: Reconstrução 10, após dois ensaios com $T_p=2,68$ s e $H_s=5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 11, após dois ensaios com $T_p=1,79$ s e $H_s=15$ cm (Direita)	51
Figura 5.27: Profundidades do fundo ao longo do grupo 2, nos pontos de coordenadas (x, y) correspondentes à profundidade máxima na medição manual	52
Figura 5.28: Reconstrução 20, após dois ensaios com $T_p=1,34$ s e $H_s=5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 21, após dois ensaios com $T_p=2,68$ s e $H_s=2,5$ cm (Direita)	52
Figura 5.29: Reconstrução 22, após dois ensaios com $T_p=2,68$ s e $H_s=2,5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 23, após dois ensaios com $T_p=2,68$ s e $H_s=5$ cm (Direita)	53
Figura 5.30: Profundidade do fundo ao longo do grupo 3, nos pontos de coordenadas (x, y) correspondentes à profundidade máxima na medição manual	54
Figura 5.31: Reconstrução 28, após dois ensaios com $T_p=1,34$ s e $H_s=5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 29, após dois ensaios com $T_p=2,23$ s e $H_s=7,5$ cm (Direita)	54
Figura 5.32: Sobreposição das cotas do Bloco C ao longo dos ensaios do grupo 1 (Baixa-mar)	55
Figura 5.33: Sobreposição das cotas do Bloco C ao longo dos ensaios do grupo 2 Preia-mar)	56
Figura 5.34: Sobreposição das cotas do Bloco C ao longo dos ensaios do grupo 3 (Preia-mar e gravilha).....	57
Figura 5.35: Reconstrução 30, após dois ensaios com $T_p=2,24$ s e $H_s=7,5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 31, após dois ensaios com $T_p=1,79$ s e $H_s=15$ cm (Direita)	58
Figura 5.36: Posição inicial (esquerda) e após a condição C2 (direita) do fundo e dos blocos no Grupo 1	59
Figura 5.37: Posição do fundo e dos blocos após a condição C7	59
Figura 5.38: Representação inicial (esquerda) e após a condição C2 (direita) do fundo e dos blocos no Grupo 2	59
Figura 5.39: Representação do fundo e dos blocos após a condição C7 no Grupo 2	60
Figura 5.40: Número de Shields no modelo ensaiado em baixa-mar	64
Figura 5.41: Número de Shields no modelo ensaiado em preia-mar.....	64
Figura 5.42 : Número de Shields no modelo ensaiado em baixa-mar com gravilha	65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Classificação da profundidade relativa	6
Quadro 2: Escala de diferentes parâmetros considerando a semelhança de Froude (Kortenhaus et al., 2005)	11
Quadro 3: Escalas consideradas no Parâmetro adimensional de Shields	14
Quadro 4: Condições de agitação marítima medidas entre Novembro e Dezembro de 2005 na proximidade da praia de Santa María del Mar	20
Quadro 5: Escalas e respectivos valores para o caso de estudo	22
Quadro 6: Níveis de maré e condições de agitação marítima ensaiadas no modelo	23
Quadro 7: Níveis de maré e respectivas profundidades	23
Quadro 8: Massa dos blocos no protótipo e massas no modelo por semelhança de Froude e por semelhança do n^o de estabilidade	24
Quadro 9: Valores das escalas a considerar no Parâmetro adimensional de Shields	24
Quadro 10: Diâmetro e massa volúmica do sedimento no protótipo e no modelo	24
Quadro 11: Estrutura e fundo adjacente de cada grupo de ensaios	30
Quadro 12: Levantamento de cotas após cada condição de agitação	45
Quadro 13: Erro quadrático médio das cotas do fundo e das cotas dos blocos entre os dois métodos de levantamento de cotas	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Designação
A	Amplitude do escoamento oscilatório junto ao fundo
a	Aceleração do fluido
a'	Amplitude da onda
b	Sub-índice referente aos blocos
D_{50}	Diâmetro mediano da granulometria do sedimento
D_*	Parâmetro adimensional do diâmetro do sedimento
EQM	Erro quadrático médio
F	Força genérica
F_r	Número de Froude
f_w	Factor de atrito da onda
g	Aceleração da gravidade
H	Altura da onda
H_s	Altura significativa da onda
h	Profundidade
k	Número de onda
L	Comprimento de onda
M	Massa
m	Sub-índice referente ao modelo
N_s	Número de estabilidade
n	Número de reconstruções de cada grupo de ensaios
P	Pressão
p	Sub-índice referente ao protótipo
q	Caudal
S	Área
s	Massa volúmica relativa do sedimento

T	Período da onda
T_p	Período de pico
t	Tempo
u^*	Velocidade de atrito
u_f	Velocidade orbital da onda junto ao fundo
u	Velocidade característica da onda
y_i	Valor de cota real (levantamento manual)
\bar{y}_i	Valor de cota estimado (levantamento por fotogrametria)
Δ	Massa volúmica submersa relativa de blocos e de estruturas marítimas
γ_w	Peso volúmico da água
η	Elevação da superfície livre
λ	Designação de escala, correspondendo ao quociente dos valores de uma grandeza, no modelo e no protótipo
ω	Frequência angular
ρ_b	Massa volúmica dos blocos
ρ_e	Massa volúmica do enrocamento
ρ_s	Massa volúmica do sedimento
ρ_w	Massa volúmica da água
τ	Tensão tangencial
θ	Parâmetro adimensional ou número de Shields
ν	Viscosidade cinemática

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a erosão costeira tem-se revelado um problema grave, com consequências à escala mundial, razão pela qual tem sido alvo de inúmeros estudos. As causas deste fenómeno são diversas, sendo devidas a processos naturais, como o vento, as marés, as correntes litorais e a agitação marítima e também a actividades antrópicas directas ou indirectas.

A mitigação do problema da erosão costeira é essencial pois existe a possibilidade do seu agravamento e consequente redução da orla costeira, o que provocaria um grave impacto ambiental, económico e social. A nível ambiental, a destruição de defesas costeiras naturais (dunas), por acção das tempestades, pode resultar em inundações costeiras. Desta forma, existindo um enfraquecimento das defesas naturais, aumenta também o risco potencial de inundação nas zonas próximas da costa (Taveira-Pinto, 2004). Quando se referem os impactos sociais e económicos, referencia-se de imediato o facto da orla costeira ser um ponto atractivo para diversas actividades de elevada importância à escala local e nacional que, com o aumento da erosão, ficariam severamente prejudicadas. Destacam-se inúmeros usos e actividades como as infra-estruturas portuárias, turismo, actividades balneares, náutica de recreio, pescas, entre outros que se desenvolvem e beneficiam das zonas costeiras (Veloso-Gomes *et al.*, 2007).

A escolha das soluções de combate à erosão costeira depende de diversos factores, como o trânsito sedimentar, o clima de agitação marítima, o regime de marés, a morfologia e a geologia da costa, as características das areias, a disponibilidade de reservas de areias e experiência anterior (Sancho, 2012). No entanto, não existe uma solução perfeita e a opção tomada deve basear-se em dados e estudos fidedignos.

Existem várias soluções em engenharia para reduzir ou estabilizar o problema da erosão costeira. As soluções convencionais passam pela construção de defesas longitudinais aderentes, de esporões, quebra-mares destacados ou pela alimentação artificial.

As estruturas do tipo quebra-mar destacado serão abordadas ao longo desta dissertação, tendo como vantagens a capacidade de dissipar a energia das ondas e proporcionar condições de deposição das areias entre a linha de costa e a estrutura e também o facto de alterarem o transporte longitudinal e transversal, permitindo em alguns casos controlar ou corrigir situações de erosão (Sancho, 2012).

Segundo Zeidler & Pilarczyk (1996), a utilização de quebra-mares destacados para protecção costeira tem vindo a aumentar um pouco por todo o mundo. É frequente que estas estruturas sejam vistas como eficazes devido aos seus bons resultados no combate à erosão, particularmente em ambientes de agitação marítima não muito severa. Foi referido que a aplicação destas estruturas na costa portuguesa e zona costeira do Atlântico pode ter resultados positivos para estados de agitação médios (Neves *et al.*, 2008). No entanto, acrescentam que, para o caso de estados de agitação extremos, estas estruturas devem ser objecto de investigação futura.

Relativamente ao efeito do solo na estabilidade das estruturas sujeitas à agitação marítima, i.e., interacção estrutura-solo-agitação, existem vários estudos sobre a erosão em torno de quebra-mares emersos. No entanto, o conhecimento sobre a erosão em torno dos quebra-mares submersos é mais limitado (Vidal *et al.*, 1992).

Ultimamente, diversos autores têm vindo a relatar falhas nos quebra-mares provocadas pela erosão do fundo, considerando a erosão localizada em torno das estruturas uma das causas dessas falhas. As medições realizadas nestes casos revelaram, precisamente, que existe um risco elevado de instabilidade da estrutura provocado pela erosão localizada (Sumer *et al.*, 2005, Muñoz-Perez *et al.*, 2015).

Há cerca de 10 anos, verificou-se a existência de erosão localizada em torno de quebra-mares submersos em algumas regiões de Itália, tais como Pellestrina, Lido di Dante, entre outras. Para averiguar a causa destes fenómenos, foi realizado um estudo experimental onde se ensaiaram cinco tipos de quebra-mares (Sumer *et al.*, 2005), tornando-se assim um dos poucos exemplos de estudo existente sobre este tema.

1.1 Objectivo do estudo

O principal objectivo desta dissertação é o estudo da interacção onda-estrutura-solo, sendo a estrutura um quebra-mar destacado e submerso colocado sobre fundo arenoso e sobre enrocamento. Nesta análise pretende-se verificar a alteração do fundo adjacente à estrutura e a instabilização da própria estrutura quando sujeita a diferentes condições de agitação marítima.

O caso de estudo desta dissertação é a estabilidade da estrutura submersa colocada para reduzir os problemas de erosão na praia de Santa Maria del Mar, em Cadiz, Espanha (Muñoz-Perez *et al.*, 2015). Este local sofreu diversos processos erosivos, tendo levado a que se construíssem dois esporões e um quebra-mar contínuo de enrocamento, paralelo à praia. Apesar das tentativas de combate à erosão, o quebra-mar não teve o efeito desejado, tendo-se enterrado por completo. Dada a situação, foram implantadas três estruturas modulares devidamente monitorizadas para que se recolhessem dados relativos à erosão em torno das estruturas, à velocidade de afundamento no solo, caso existisse, e à evolução da posição dos blocos constituintes das estruturas ao longo do tempo. Um mês após a colocação destas estruturas já se observava um assentamento significativo das mesmas.

Para aprofundar o conhecimento dos fenómenos que levaram ao assentamento dessas estruturas modulares, procedeu-se, no âmbito desta dissertação, à modelação física do caso de estudo, considerando inicialmente as escalas necessárias a aplicar ao modelo. As escalas foram aplicadas à estrutura, composta por blocos, ao material do fundo (sedimento e enrocamento), aos níveis de maré (baixa-mar e preia-mar), às condições de agitação (altura de onda significativa e período de pico) e ao tempo de duração de uma condição de agitação num

determinado nível de maré. Definidos estes parâmetros, foi possível construir o modelo e passar à fase dos ensaios, recolha de dados e posterior análise.

Os ensaios realizados foram divididos em três grupos:

1. Ensaio em baixa-mar e estrutura assente no fundo natural, composto por sedimento;
2. Ensaio em preia-mar e estrutura assente no fundo natural, composto por sedimento;
3. Ensaio em baixa-mar e estrutura assente em gravilha (enrocamento).

Através da modelação física deste caso pretendeu-se compreender o comportamento da estrutura e do fundo natural subjacente ao longo dos três grupos de ensaios, isto é, estudar a influência do nível de maré e da estabilidade do material onde assenta a estrutura na alteração do fundo e na estabilidade da estrutura. Assim, como objectivo final, pretendeu-se avaliar o factor ou conjunto de factores responsáveis pela instabilização da estrutura e alteração do fundo, de modo a compreender melhor os fenómenos envolvidos.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por seis capítulos. O capítulo 1 é introdutório, onde são apresentados problemas e soluções relacionados com a erosão costeira, seguindo-se a apresentação do objectivo do estudo e da metodologia de trabalho. No capítulo 2 faz-se um resumo das bases teóricas em que esta dissertação se baseia, incluindo referências a características das ondas e dos sedimentos, à teoria da semelhança e à fotogrametria. Esta foi uma das técnicas usadas nos ensaios para obtenção das cotas dos blocos e da batimetria do fundo. O capítulo 3 é constituído pelo caso de estudo, onde se faz a descrição do problema real com indicação das características geométricas da estrutura e das condições de agitação a reproduzir neste estudo. O capítulo 4 trata da modelação física, onde são apresentados os cálculos de escalas necessários à construção e exploração do modelo, a descrição da instalação experimental e respectiva instrumentação e a metodologia de ensaio. O capítulo 5 apresenta os resultados da agitação marítima e os valores de cotas do fundo e dos blocos obtidos através da fotogrametria e do levantamento manual. Seguidamente comparam-se os dois métodos de levantamento de cotas utilizados assim como os resultados obtidos no modelo com os do protótipo. Este capítulo termina com a discussão dos resultados obtidos. O último capítulo resume as conclusões retiradas a partir dos resultados obtidos, sugerindo-se recomendações a aplicar em trabalhos futuros. A dissertação termina com a indicação das referências bibliográficas utilizadas.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Este capítulo tem como objectivo apresentar de forma sucinta os fundamentos teóricos sobre agitação marítima e características de sedimentos, que remetem para o início do transporte sólido.

2.1 Características das ondas de superfície

As ondas existentes no mar têm comportamentos diversos e estão em constante alteração no que se refere à sua forma, energia e direcção. Para a compreensão dos termos e símbolos usados para a caracterização da agitação nos próximos capítulos, descreve-se o caso mais simples de uma onda sinusoidal. Os principais parâmetros utilizados para caracterizar uma onda sinusoidal são (Figura 2.1):

- Comprimento de onda, L , distância horizontal entre a passagem de um ponto idêntico da superfície livre;
- Período da onda, T , tempo que decorre entre a passagem de um ponto idêntico da superfície livre;
- Altura da onda, H , distância vertical entre a crista e a cava da onda;
- Amplitude da onda, a' , distância vertical máxima, em relação ao nível médio do mar;
- Profundidade, h , distância entre o nível médio e o fundo do mar;
- Elevação da superfície livre, η , distância vertical entre o nível médio e a posição instantânea da superfície livre.

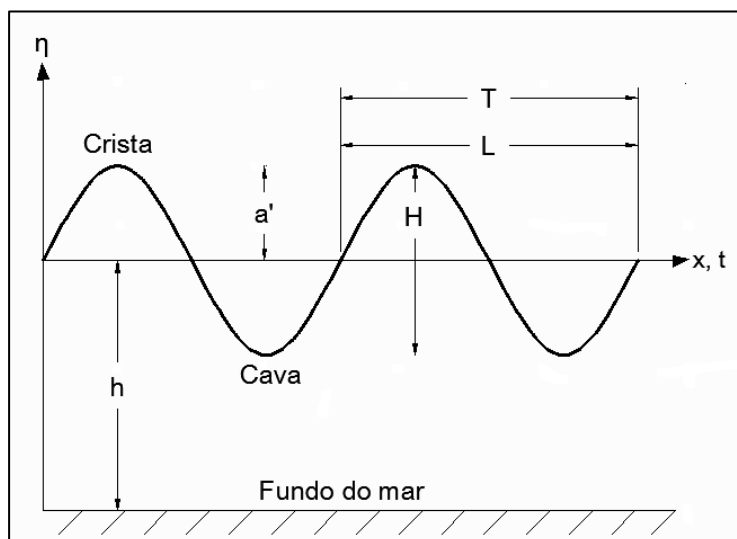


Figura 2.1: Parâmetros básicos de uma onda de superfície
(adaptação de Silva, 2009)

Consoante o valor da relação entre o comprimento de onda e a profundidade, as águas podem considerar-se como águas de grandes profundidades, de profundidades intermédias e pequenas profundidades, tal como se apresenta no Quadro 1.

Quadro 1: Classificação da profundidade relativa

Tipos de profundidade	h/L
Grandes Profundidades	$1/2$ a ∞
Profundidades intermédias	$1/20$ a $1/2$
Pequenas profundidades	0 a $1/20$

Dependendo da profundidade, as partículas de água descrevem trajectórias com diferentes geometrias na direcção horizontal e vertical. Para a representação matemática das ondas, que permite definir estas trajectórias, a forma da onda, a sua velocidade, etc., recorre-se a teorias de onda. A Teoria Linear das ondas é aplicada para ondas onde a amplitude é pequena em relação ao comprimento de onda. Esta teoria permite calcular diversos parâmetros da onda (velocidade, aceleração, etc.), em certos casos, com precisão razoável. Segundo a Teoria Linear, as partículas de água descrevem movimentos orbitais fechados, o que significa que uma partícula presente num fluido retorna à sua posição inicial após um ciclo de onda (Dean & Dalrymple, 1991).

Assim, em águas profundas ($h/L > 1/2$), as partículas descrevem movimentos orbitais circulares com raio exponencialmente decrescente com o aumento da profundidade, raio esse que tenderá para zero com a aproximação do fundo. Relativamente a zonas com profundidades intermédias ou pequenas profundidades ($h/L \leq 1/2$), as trajectórias orbitais são elípticas e, tal como no caso anterior, a sua dimensão diminui com a profundidade, embora de forma menos acentuada (Figura 2.2).

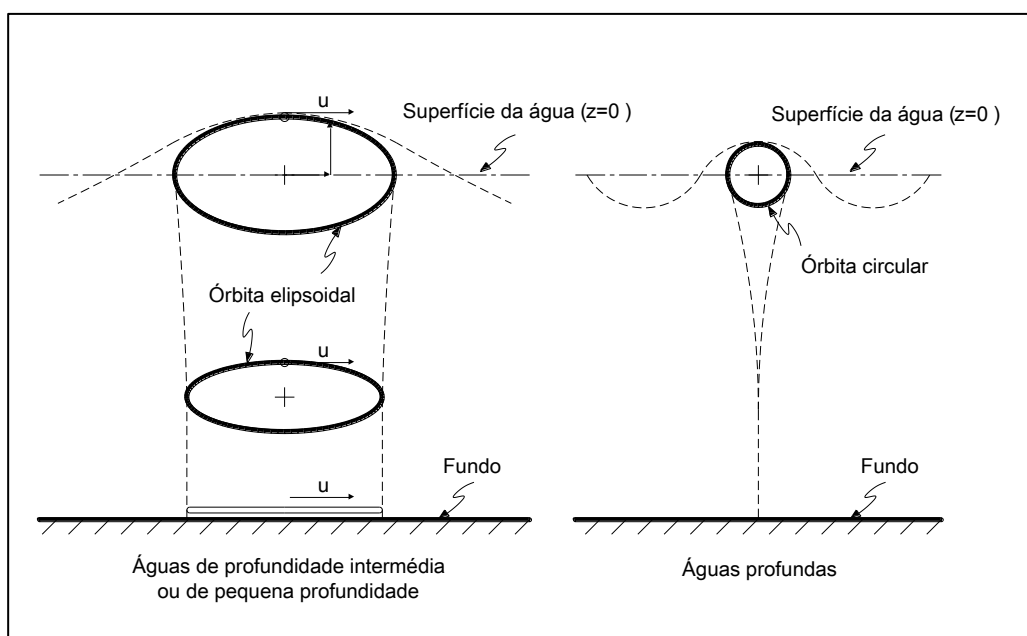


Figura 2.2: Trajectória de partículas de água à superfície e em profundidade (adaptação de Dean & Dalrymple, 1991)

2.2 Transporte de sedimentos

Os sedimentos têm uma importância significativa em zonas costeiras porque é através do seu transporte que se define a configuração da costa.

Para a caracterização da dimensão dos sedimentos de um dado local é necessário recolher amostras. No entanto, segundo King & Galvin (2002), o diâmetro dos sedimentos num dado local tem variações consideráveis, provocadas por factores externos como a estação do ano ou a maré. É referido que no Verão a dimensão dos sedimentos é superior à do Inverno e que existe uma variação grande em termos de dimensão de grãos visivelmente depositados na praia, aquando da maré baixa. Desta forma, estes autores sugerem a recolha entre marés e em diferentes épocas, de forma a que se conjugue as diferentes amostras e se caracterize com maior precisão os sedimentos.

A dimensão dos grãos é normalmente referida como D_n , onde n representa a percentagem em massa que corresponde ao diâmetro da peneira em que passam $n\%$ dos sedimentos da amostra. Portanto, D_{50} corresponde ao valor mediano e é o termo mais utilizado quando há referências a granulometrias.

Para caracterizar os sedimentos no meio fluido recorre-se frequentemente a parâmetros adimensionais, tais como D_* , parâmetro que tem em conta não só o diâmetro do grão como a viscosidade do fluido e massa volúmica relativa do sedimento e dado por (Soulsby, 1997):

$$D_* = \left[\frac{g (s - 1)}{\nu^2} \right]^{1/3} \times D_{50} \quad (1)$$

onde:

g	-	Aceleração da gravidade	$[\text{m/s}^2]$
s	-	Massa volúmica relativa do sedimento $\left(= \frac{\rho_s}{\rho_w} \right)$	$[-]$
ν	-	Viscosidade cinemática	$[\text{m}^2/\text{s}]$
D_{50}	-	Diâmetro mediano do sedimento	$[\text{m}]$
ρ_s	-	Massa volúmica do sedimento	$[\text{kg/m}^3]$
ρ_w	-	Massa volúmica da água	$[\text{kg/m}^3]$

Existem diferentes mecanismos de transporte de sedimentos, que são aqui resumidos com o objectivo de evidenciar as suas diferenças e de justificar a escolha do transporte mais importante em estudos de interacção de ondas com estruturas submersas.

É comum dividir os mecanismos de transporte de sedimentos em duas partes:

- Transporte sólido por arrastamento;
- Transporte sólido por suspensão.

O transporte sólido por arrastamento consiste no transporte de sedimentos com granulometria semelhante à da areia ou de dimensão superior, junto ao leito de fundo.

O transporte sólido por suspensão refere-se aos materiais mais finos, como silte, argila e areia fina, que se deslocam em suspensão, não tendo qualquer contacto com o fundo (Fredsoe & Deigaard, 1992).

O início do movimento pode ser expresso em termos de tensão tangencial no fundo, através de um parâmetro adimensional, desenvolvido por Shields (1936), que relaciona a tensão tangencial com a força necessária para mover os sedimentos do fundo. Deste modo, Shields sugeriu uma medida de equilíbrio entre forças perturbadoras e forças de estabilização em grãos de areia no leito, para movimento de sedimentos em escoamento permanente que ficou conhecido por Parâmetro ou Número de Shields, θ , dado por (Nielsen, 1992):

$$\theta = \frac{\tau}{\rho_w (s - 1) g D_{50}} \quad (2)$$

onde:

τ - Tensão tangencial no fundo [N/m²]

O Número de Shields crítico, θ_{cr} , é usualmente obtido pela expressão (2), substituindo-se o valor da tensão tangencial no fundo pela tensão tangencial crítica no fundo, τ_{cr} , que representa a tensão a partir da qual se dá início ao transporte de sedimentos. No entanto, pode ser expresso em função do parâmetro adimensional do diâmetro do sedimento, D_* , (Soulsby, 1997) dada por:

$$\theta_{cr} = \frac{0,30}{1 + 1,2D_*} + 0,055[1 - \exp(-0,02D_*)] \quad (3)$$

Deste modo, em termos de número de Shields, o início do movimento de sedimentos ocorre quando a tensão de Shields adimensional, θ , for superior à tensão crítica de Shields, θ_{cr} .

2.3 Teoria da Semelhança

A evolução da Mecânica de Fluidos deve-se muito a trabalhos experimentais e particularmente à utilização de modelos reduzidos. Um modelo físico permite reproduzir processos complexos e não-lineares e condições de fronteira que não são facilmente expressáveis através de equações de modelos numéricos. Em muitas situações, como é o caso da estabilidade de estruturas marítimas, a modelação física simula melhor alguns processos de um protótipo do que quaisquer equações ou análises bidimensionais.

É de salientar que a construção de modelos físicos, em escalas reduzidas, só foi possível com a introdução da Teoria da Semelhança, por Isaac Newton. Deste modo, podem extrapolar-se os resultados obtidos em modelo físico para resultados do respectivo protótipo.

A Teoria da Semelhança utiliza números adimensionais, os quais relacionam as variáveis determinantes num problema particular. O Teorema dos Pi de Buckingham permite obter todos os números adimensionais em função das variáveis e das suas dimensões fundamentais.

A aplicação de leis de escala é fundamental para a execução de modelos físicos, de modo a que se transformem acções reais em acções equivalentes a aplicar ao modelo. Deste modo, o modelo comportar-se-á de forma idêntica ao protótipo, conseguindo-se assim reproduzir os fenómenos pretendidos.

A escala de uma grandeza x , λ_x , é definida pela razão entre um valor de grandeza do protótipo linear, x_p , e um valor de grandeza do modelo, x_m .

$$\lambda_x = \frac{x_p}{x_m} \quad (4)$$

A escala de um modelo é escolhida de modo a que todas as condições de agitação marítima e parâmetros estruturais sejam fielmente reproduzidos. Para tal é necessário haver semelhança geométrica, semelhança cinemática e semelhança dinâmica.

A semelhança geométrica é a semelhança de formas entre o modelo e o protótipo e traduz-se numa relação constante entre os comprimentos homólogos do protótipo (L_p) e do modelo (L_m), resultando uma escala geométrica, $\lambda_L = L_p/L_m$ (Quintela, 1981).

A semelhança cinemática é a semelhança do movimento e consiste na razão entre intervalos de tempo que partículas homólogas descrevam ao longo de percursos homólogos, $\lambda_t = t_p/t_m$ (Quintela, 1981).

A semelhança dinâmica é a semelhança de forças e implica que as forças reais e do modelo têm uma relação constante, $\lambda_F = F_p/F_m$. Como a aceleração de uma partícula depende das forças actantes, a semelhança dinâmica pressupõe a semelhança geométrica e a semelhança cinemática (Quintela, 1981).

2.4 Escala

Devido à impossibilidade de se obter semelhança dinâmica entre o protótipo e o modelo para todas as forças actantes, alguns fenómenos podem não ser bem reproduzidos.

No caso de estudo de modelos reduzidos em estruturas marítimas é muito comum que se despreze o efeito das forças de viscosidade, perdendo-se algum rigor de resultados no modelo, perda essa que será tanto maior quanto a escala geométrica mais se afastar da

unidade. Existem então erros devidos a efeitos de escala (Quintela, 1981). Para reduzir estes erros, analisam-se os principais fenómenos a estudar e procura-se que estes estejam bem descritos no modelo. Para tal, de acordo com as principais forças actuantes, escolhe-se um parâmetro adimensional que os tenha em conta e procura-se que o seu valor seja o mesmo no modelo e no protótipo, obtendo-se assim semelhança dinâmica relativamente a essas forças.

Existem vários parâmetros adimensionais frequentemente usados nos modelos físicos e que correspondem a considerar uma relação de forças entre modelo e protótipo: semelhança de Froude (forças de pressão, gravidade e inércia), de Cauchy (forças elásticas e de inércia), de Weber (inércia e tensão superficial) e de Reynolds (forças de pressão, viscosidade e inércia).

Para reduzir ao máximo os possíveis efeitos de escala, é aconselhável optar por modelos de grande escala, isto é, com uma relação entre modelo e protótipo o mais perto possível de 1. No entanto, deve ter-se em conta se os benefícios compensam o custo e tempo, já que modelos de grandes dimensões podem ser complicados, dispendiosos e nem sempre são necessários. Além disso, as dimensões das instalações necessárias e o tempo de ensaio podem tornar o modelo proibitivo. Assim, normalmente, na escolha da escala a utilizar, e tendo em conta a instalação e o equipamento disponível, inicia-se por se escolher a escala geométrica. Existem vários factores que devem ser considerados para a escolha da escala geométrica de um modelo físico no âmbito de estudos de estruturas marítimas. São enumerados seguidamente os principais factores geralmente condicionantes na decisão da escolha da escala geométrica, λ_L (Hydralab III, 2007):

- A experiência com modelos físicos de natureza semelhante;
- As condições das ondas e níveis de água a ensaiar, comparativamente com as limitações do batedor e profundidade do tanque ou canal onde se realizam os ensaios;
- A batimetria a reproduzir;
- As dimensões das instalações (tanque ou canal);
- A gama de parâmetros a ser considerada no modelo.

Uma vez definida a escala geométrica e tendo em conta os fenómenos que se pretendem reproduzir no modelo, escolhem-se, como referido anteriormente, os parâmetros adimensionais que os tenham em conta e procura-se que o seu valor seja o mesmo no modelo e no protótipo, obtendo-se assim semelhança dinâmica relativamente a essas forças. Em estudos de estruturas marítimas sujeitas à acção da onda e com fundo móvel é necessário reproduzir a propagação das ondas, a estabilidade das estruturas e o movimento dos sedimentos.

No que se refere à propagação e rebentação de ondas, o parâmetro que é utilizado é o número de Froude, pois os efeitos de pressão, gravidade e inércia são mais relevantes. Assim, obtém-se semelhança dinâmica quando se iguala o número de Froude no modelo e no protótipo. Consequentemente, as forças devidas à fricção (Semelhança de Reynolds), os efeitos de elasticidade (Semelhança de Cauchy) e as forças de tensão superficial (Semelhança de Webber)

são desprezados na maioria dos modelos físicos (Korthenhaus *et al.*, 2005). Em particular, segundo Hughes (1993), o efeito de escala devido a não se considerar a semelhança de Reynolds, para números de Reynolds superiores a 1×10^4 é desprezável. Relativamente à semelhança de Weber, Wolters (2007) refere que a tensão superficial das ondas é geralmente insignificante no protótipo e por esse motivo se o modelo não for muito pequeno (comprimentos de onda superiores a 0,02 m, ondas com períodos superiores a 0,35 s e profundidades superiores a 0,02 m), o efeito de escala devido a não se considerar a semelhança de Weber é desprezável. Os números de Reynolds foram calculados considerando a velocidade como velocidade orbital junto ao fundo e a profundidade em substituição do diâmetro, obtendo-se valores próximos e superiores a 1×10^4 . Assim, a semelhança dinâmica requer números de Froude iguais no protótipo e no modelo, ou seja:

$$F_{r,p} = F_{r,m} \Leftrightarrow \frac{u_p}{\sqrt{g \times L_p}} = \frac{u_m}{\sqrt{g \times L_m}} \quad (5)$$

onde:

u_p	- Velocidade característica do protótipo	[m/s]
u_m	- Velocidade característica do modelo	[m/s]
L_p	- Comprimento característico do protótipo	[m]
L_m	- Comprimento característico do modelo	[m]

A partir desta relação e fixando a escala geométrica, é possível obter-se a escala de velocidades λ_v , a escala de tempo λ_t e a escala de acelerações λ_a , entre outras. No Quadro 2 apresentam-se as principais relações de escala entre modelo e protótipo considerando a semelhança de Froude e uma escala geométrica, λ_L .

Quadro 2: Escala de diferentes parâmetros considerando a semelhança de Froude (Kortenhaus *et al.*, 2005)

Parâmetro	Unidades	Escala
Comprimento	[m]	λ_L
Área	[m ²]	$\lambda_S = \lambda_L^2$
Volume	[m ³]	$\lambda_V = \lambda_L^3$
Tempo	[s]	$\lambda_t = \sqrt{\lambda_L}$
Velocidade	[m/s]	$\lambda_u = \sqrt{\lambda_L}$
Aceleração	[m/s ²]	$\lambda_a = 1$
Massa	[kg]	$\lambda_M = \lambda_\rho \lambda_L^3$
Pressão	[Pa]	$\lambda_P = \lambda_\rho \lambda_L$
Força	[N]	$\lambda_F = \lambda_\rho \lambda_L^3$
Caudal	[m ³ /s/m]	$\lambda_q = \lambda_L^{1.5}$

Em estudos que envolvam a estabilidade de blocos de estruturas marítimas, quer enrocamento quer artificiais de betão, e de forma a garantir que há correspondência da sua estabilidade no modelo, assegura-se que o número de estabilidade, N_s , seja o mesmo no protótipo e no modelo. Neste parâmetro, as diferenças de massa volúmica de água entre modelo e protótipo são contabilizadas, atendendo ao facto da água do protótipo ser salgada e a água do modelo ser, na maioria dos casos, doce (Wolters, 2007).

O número de estabilidade é dado por:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} \quad (6)$$

onde:

H_s	-	Altura significativa de onda	[m]
Δ	-	Massa volúmica submersa relativa dos blocos ($= (\rho_b - \rho_w)/\rho_w$)	[-]
ρ_b	-	Massa volúmica dos blocos	[kg/m ³]
ρ_w	-	Massa volúmica da água	[kg/m ³]
D_n	-	Diâmetro nominal dos blocos de protecção $\left(= \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_b}}\right)$	[m]
M	-	Massa dos blocos	[kg]

Assim, a estabilidade dos blocos está garantida quando o valor de N_s é igual no protótipo, $N_{s,p}$, e no modelo, $N_{s,m}$, ou seja:

$$N_{s,m} = N_{s,p} \Leftrightarrow \frac{H_{s,m}}{\Delta_m \times D_{n,m}} = \frac{H_{s,p}}{\Delta_p \times D_{n,p}} \quad (7)$$

onde os índices m e p se referem aos valores do modelo e do protótipo, respectivamente.

A partir desta relação e fixando a escala geométrica, λ_L , e sabendo previamente os valores de massa volúmica no modelo e no protótipo, determina-se a escala de massas, λ_M ,

$$\lambda_M = \frac{\lambda_L^3 \times \lambda_{\rho_b}}{\lambda_{\Delta}^3} \quad (8)$$

e consequentemente, o valor da massa no modelo, M_m , sabendo a massa no protótipo, M_p .

$$M_m = \frac{M_p \times \lambda_{\Delta}^3}{\lambda_L^3 \times \lambda_{\rho_b}} \quad (9)$$

O início do movimento dos sedimentos sujeitos a escoamentos permanentes e oscilatórios tem atraído um considerável interesse da comunidade científica. Contudo, o “início do movimento” é difícil de definir e o consenso não é fácil no que se refere às variáveis que o caracterizam.

Como referido anteriormente, um dos parâmetros muito utilizados em estudos de hidráulica marítima para caracterizar o início do movimento é o Número de Shields. Em escoamentos permanentes, a tensão tangencial pode ser aproximada pelo quadrado da velocidade de atrito, obtendo-se:

$$\tau = \rho_w \times u_*^2 \quad (10)$$

No caso de estudos de hidráulica marítima, o escoamento é devido à agitação e tem, por isso, carácter oscilatório. No caso de escoamentos oscilatórios, o Número de Shields, θ , correspondente à tensão total, é geralmente definido em termos de tensão tangencial, sendo dado por (Grasso *et al.*, 2009, Dean & Dalrymple, 1991):

$$\tau = \rho_w \times \frac{f_w \times (A \omega)^2}{2} \quad (11)$$

Em que: $A \omega = u_f \quad (12)$

$$u_f = \frac{H \pi}{T \sinh(k h)} \quad (13)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (14)$$

$$L = \frac{g \times T^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (15)$$

$$f_w = 0,48 \left(\frac{2,5 \times D_{50}}{A} \right)^{0,75} \quad (16)$$

$$A = \frac{H}{2 \times \sinh(k h)} \quad (17)$$

Assim, a partir da equação (2) e substituindo a tensão tangencial τ , obtém-se:

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{f_w \times u_f^2}{(s - 1) g D_{50}} \quad (18)$$

onde:

f_w	- Factor de atrito da onda	[-]
A	- Amplitude do escoamento oscilatório junto ao fundo	[m]
ω	- Frequência angular da onda	[1/s]
u_f	- Velocidade orbital junto ao fundo	[m/s]
T	- Período da onda	[s]
k	- Número de onda	[1/m]

A semelhança de Shields requer o mesmo valor do Número de Shields no protótipo e no modelo, ou seja:

$$\theta_p = \theta_m \Leftrightarrow \left[\frac{1}{2} \frac{f_w \times u_f^2}{(s-1) g D_{50}} \right]_p = \left[\frac{1}{2} \frac{f_w \times u_f^2}{(s-1) g D_{50}} \right]_m \quad (19)$$

A partir desta relação, fixando a escala geométrica e calculando a escala de peso volúmico submerso relativo do sedimento, λ_{s-1} , é possível obter-se a escala de diâmetro característico da granulometria do sedimento, $\lambda_{D_{50}}$. O Quadro 3 resume as escalas mencionadas em cima.

Quadro 3: Escalas consideradas no Parâmetro adimensional de Shields

Parâmetro	Unidades	Escala
Peso volúmico submerso do sedimento	[N/m ³]	$\lambda_{s-1} = \frac{(s-1)_p}{(s-1)_m}$
Diâmetro característico do sedimento	[m]	$\lambda_{D_{50}} = \frac{\lambda_L}{\lambda_{s-1}^4}$

Deste modo, visto ter-se obtido a escala de diâmetros do sedimento e sabendo à priori a dimensão do sedimento do protótipo, obtém-se o diâmetro característico do sedimento no modelo:

$$D_{50,m} = \frac{D_{50,p}}{\lambda_{D_{50}}} \quad (20)$$

2.5 Fotogrametria

Em hidráulica marítima, em estudos de estabilidade de estruturas marítimas, é comum utilizar-se modelos físicos reduzidos de forma a avaliar a sua estabilidade quando interage com a agitação. No caso de fundo móvel, há a necessidade acrescida da avaliação da interacção entre a agitação, a estrutura e o fundo.

Quando o objectivo dos ensaios é verificar a estabilidade da estrutura, esta verificação pode ser facilitada utilizando um método de levantamento da envolvente, baseado numa técnica de nome estéreo-fotogrametria.

A palavra fotogrametria deriva do grego, *photon* (luz), *grafos* (escrita) e *metron* (medidas), definida como a técnica que permite extrair a forma, dimensão e posição dos objectos contidos nas imagens.

A fotogrametria foi muito utilizada no último século, principalmente em fotografias aéreas. No entanto, nos últimos anos, esta técnica tem vindo a expandir-se em diversas áreas como a

medicina e a engenharia, nomeadamente em estudos de estruturas e de hidráulica (Mikhail *et al.*, 2001)

A estéreo-fotogrametria baseia-se no mesmo princípio da visão binocular, onde a imagem captada por cada olho, individualmente, é transmitida ao cérebro, o qual deverá ser capaz de fundir as duas imagens, ligeiramente diferentes devido à diferente perspectiva, criando uma representação 3D da cena observada, resultando daí a chamada visão estéreo ou estéreopsia. Para utilização desta técnica, é necessário que as duas imagens sejam obtidas tão perto quanto possível, através de máquinas fixas e alinhadas numa estrutura, também ela fixa. A distância entre os centros de cada lente deve ser curta para evitar fotografar diferentes faces de um objecto, tornando-se nesse caso impossível proceder à reconstrução dos pares de imagens (Lemos *et al.*, 2014).

Sendo o objectivo da fotogrametria a obtenção de uma reconstrução tridimensional da superfície a partir de pares de imagens, torna-se necessário que as câmaras sejam disparadas ao mesmo tempo.

Finalmente, para que se obtenham bons resultados na reconstrução utilizando visão estéreo, é necessário que as câmaras sejam calibradas antes da recolha de imagens da envolvente. O processo de calibração define os parâmetros utilizados para medir distâncias e ângulos, bem como as posições absolutas do espaço tridimensional reconstruído. Para tal, no método utilizado nesta dissertação e que vem sendo aplicado no LNEC, é utilizado um alvo com padrão de xadrez, que é fotografado, quando emerso, pelas duas máquinas simultaneamente cerca de 15 vezes, com ângulos de inclinação diferentes, de modo que a reconstrução tridimensional seja o mais precisa possível, o que é especialmente importante quando existem superfícies inclinadas na estrutura que se pretende reconstruir (Figura 2.3).



Figura 2.3: Alvo de calibração

O processo de reconstrução é executado após a aquisição de pares de imagens contendo a área a reconstruir e também o alvo flutuante. As quadrículas do alvo, de dimensão conhecida, definem a origem no plano e é através delas que se define a dimensão do volume

fotografado e o nível de água. O *output* do processo consiste num ficheiro (x, y, z) que contém uma nuvem de pontos reconstruídos e que pode ser importado por diversas ferramentas para visualização da envolvente tridimensional (Lemos & Santos, 2010). O processo da reconstrução tem vindo a ser facilitado com a utilização de fotografias digitais que permitem uma fácil manipulação das imagens.

Para analisar os pares de imagens é necessário utilizar programas de processamento de imagens, tendo-se para esta dissertação usado um *software* que permite corrigir a refração da luz na interface água-ar, composto por duas aplicações distintas implementadas em MATLAB (Ferreira et al., 2006):

- O *software* de calibração das câmaras, onde se define o parâmetro utilizado para medir distâncias e ângulos, bem como posições absolutas no mundo tridimensional reconstruído;
- O módulo de reconstrução tridimensional da envolvente, que consiste em identificar a profundidade a partir de dois pontos de vista diferentes, da mesma cena, considerando o nível de água como $z = 0$.

Assim, esta técnica permite a obtenção de uma superfície tridimensional do fundo e, desta forma, permite quantificar e apresentar graficamente, numa determinada área, as alterações da cota do fundo e identificar as zonas onde ocorreram fenómenos de erosão ou de deposição.

A resolução da imagem na área em análise é uma das limitações desta técnica quando comparada com o método de levantamento manual. Para que se obtenham bons resultados, é necessário haver precisão no posicionamento dos equipamentos. Na fotogrametria, quanto maior a distância das câmaras à zona a fotografar, maior a área em estudo, mas menor a precisão e vice-versa, obrigando a que haja um compromisso entre a zona a fotografar e a precisão dos resultados. Além disso, estudos realizados no LNEC (Lemos *et al.*, 2012) comprovaram que a reconstrução da envolvente com utilização de padrões monocromáticos e/ou textura muito regular no fundo não apresentava boa definição dos elementos constituintes.

O levantamento manual tem a vantagem, relativamente à fotogrametria, de ter o mesmo erro de medição qualquer que seja o ponto em que se faça o levantamento de cotas. Uma outra vantagem é manter inalterado o referencial vertical, que ao contrário da fotogrametria, depende do nível de água no tanque. O levantamento manual apresenta ainda a possibilidade de abranger uma área de levantamento de pontos bastante mais ampla que a fotogrametria sem alterar a precisão de resultados. No entanto, os dados obtidos são pontuais e o número de pontos a medir é necessariamente limitado.

3. CASO DE ESTUDO

3.1 Descrição do caso de estudo

A praia de Santa Maria del Mar possui cerca de 450 m de comprimento na direcção longitudinal está localizada no Golfo de Cadiz, na costa sudoeste de Espanha, perto do Estreito de Gibraltar. A Figura 3.1 é ilustrativa da localização da área em estudo.



Figura 3.1: Localização da área em estudo (fonte: Google Earth)

A praia em estudo apresentou no passado processos erosivos de grande dimensão, devidos à acção das ondas, razão pela qual foram adoptadas duas soluções diferentes de combate à erosão.

Em 1984 foram construídos dois esporões (Figura 3.1), um em cada extremidade da praia, para prevenção do transporte de sedimentos longitudinal. Apesar destas obras de protecção costeira terem sido eficazes na prevenção do transporte de sedimentos paralelo à costa, a sua função não foi cumprida no que se refere ao transporte perpendicular de sedimentos, sendo necessária a colocação de 10-15.000 m³ de areia por ano para que a praia mantivesse o mesmo volume de sedimentos (Muñoz-Perez *et al.*, 2015).

Adicionalmente, em 1997, foi colocado um quebra-mar submerso contínuo de enrocamento, paralelo à praia, localizado entre os dois esporões, com o objectivo de dissipar a energia das ondas, reduzindo a quantidade de areia transportada na direcção perpendicular à costa. O quebra-mar referido tinha 400 m de comprimento, 2 m de altura e foi colocado a 3 m de profundidade (Muñoz-Perez *et al.*, 2015).

Depois das tempestades de Inverno desse ano e menos de seis meses após a finalização da última estrutura, foi realizada uma inspecção por mergulhadores. Verificaram que a estrutura afundou ao longo do fundo arenoso até atingir o leito rochoso (Medina *et al.*, 2006). Em 1998 foi realizada uma campanha para perceber qual a profundidade atingida pelo quebra-mar e observou-se que existia uma camada de areia sobre a estrutura com 1 m a 1,5 m.

Com o objectivo de estudar o fenómeno ocorrido, foram colocadas três estruturas de teste modulares de betão no eixo paralelo à praia (Figura 3.2) isto é, sobre o quebra-mar submerso que afundou. As estruturas são de betão, constituídas por blocos vazios de secção transversal quadrangular ($2,5\text{m} \times 2,5\text{m} \times 2,0\text{m}$) e de secção triangular ($2,0\text{m} \times 2,0\text{m} \times 2,5\text{m}$), conferindo-lhes assim a forma trapezoidal, como identificado na Figura 3.3. Nas estruturas 1 e 2, do centro e do sul da baía, respectivamente, foram adicionados dois blocos triangulares nas extremidades. A estrutura 3, localizada mais a norte, estava assente sobre uma camada de enrocamento de espessura 10 a 15 cm e de diâmetro entre 1 a 2 cm e não possuía blocos triangulares nos extremos (Muñoz-Perez *et al.*, 2015).

As figuras seguintes ilustram a localização das estruturas de teste relativamente à praia e a sua forma geométrica. A Figura 3.2 não se encontra à escala, de forma a permitir identificar as estruturas que têm comprimentos de 15 m (estrutura 1 e 2) e de 10 m (estrutura 3).

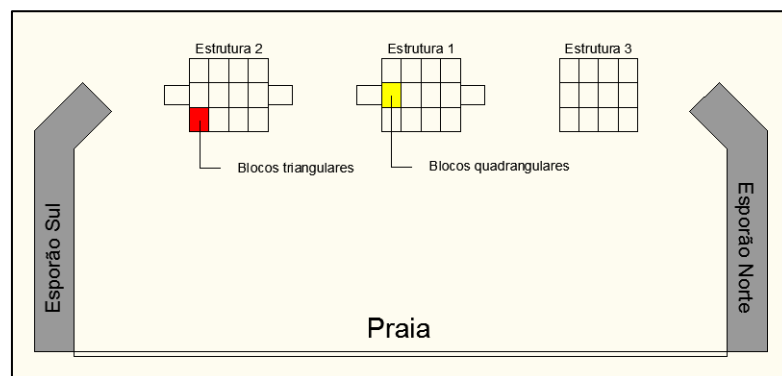


Figura 3.2: Esquema indicativo da localização das estruturas modulares

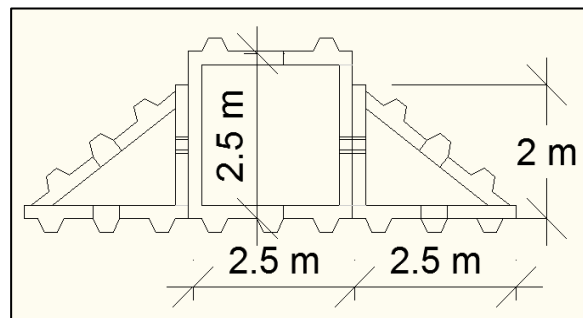


Figura 3.3: Geometria da secção transversal no protótipo

As estruturas foram alvo de uma instrumentação que incluiu sensores de pressão, imagens sonar e marcações específicas nos blocos para levantamento de cotas, permitindo que se fizesse um acompanhamento da sua posição. Estes equipamentos permitiram detectar a erosão em torno das estruturas, a velocidade de afundamento ou assentamento no solo e a evolução da profundidade dos blocos ao longo do tempo.

As estruturas 1, 2 e 3 (Figura 3.2) foram colocadas nos dias 12, 16 e 17 de Novembro de 2005, respectivamente. A 17 de Dezembro, através de medições topográficas, verificou-se que os blocos das estruturas 1 e 2 se tinham afundado cerca de 1,3 e 1,2 m, respectivamente. A

estrutura 3 sofreu um afundamento de 0,8 m, o que representa cerca de 20% menos que o das outras duas estruturas, no mesmo período de tempo (Muñoz-Perez *et al.*, 2015).

Relativamente ao leito arenoso, entre 17 de Dezembro e 4 de Janeiro de 2006 ocorreu deposição de sedimentos nesta zona. Assim, comparando as batimetrias iniciais e finais da área de estudo, verificou-se uma ligeira acumulação de sedimentos em toda a praia submersa durante a temporada de inverno (Muñoz-Perez *et al.*, 2015).

Desde o início da ocorrência de deposição, o afundamento dos blocos que compõem as estruturas praticamente terminou. Contudo, até à última data de medição, a 8 de Fevereiro de 2006, as estruturas ainda submergiram alguns centímetros, entre 0 a 10 cm nas estruturas 1 e 2 e 20 a 30 cm na estrutura 3. Esta segunda fase de afundamento pode ser explicada pelo impacto das ondas ou consolidação da camada de areia que se encontra sob as estruturas.

Esta diferença no comportamento da estrutura 3 indica que a presença de enrocamento colocado sob a estrutura não alterou a profundidade de afundamento, apenas diminuiu a velocidade com que se afundou. Este acontecimento deve-se, provavelmente, às reduzidas dimensões da camada de enrocamento por seixos de 1-2 cm de diâmetro, com uma espessura de 10-15 cm e uma extensão de 3 m em torno da estrutura.

Devido aos últimos acontecimentos descritos, houve necessidade de simular as estruturas num modelo físico reduzido. Deste modo, foram calculadas as escalas indispensáveis à construção do modelo, que de seguida foi construído.

3.2 Condições de agitação

As condições de agitação estão directamente relacionadas com o nível de maré e podem ser caracterizadas pela sua altura significativa de onda (H_s) e período de pico (T_p).

Para que se tivesse um conhecimento aprofundado sobre a ondulação local no período em estudo, foram recolhidos dados de uma bóia ondógrafo, localizada em Cadiz, em frente à praia de Santa Maria del Mar, a uma profundidade de 21 m (www.puertos.es), entre Outubro de 2005 e Fevereiro de 2006. Tal como referido anteriormente, a maior alteração do fundo e maior instabilização das estruturas deu-se até ao dia 17 de Dezembro. Deste modo, analisaram-se nesta dissertação os dados referentes aos meses de Novembro e Dezembro de 2005.

Para simular as condições de agitação e níveis de maré reais, simularam-se as condições nos dois meses referidos, onde se incluíam condições de agitação de tempestade nos dias 2 e 4 de Dezembro de 2005, seguida de uma fase de menor agitação após o dia 6 de Dezembro. Deste modo, optou-se por simular as condições de agitação ocorridas entre o dia após a colocação da primeira estrutura, 12 de Novembro e o dia 6 de Dezembro de 2005.

Os dados de agitação marítima recolhidos e utilizados nesta dissertação são apresentados no Quadro 4 (Muñoz-Perez *et al.*, 2015). Nele apresenta-se a altura de onda significativa e o período de pico representativos do intervalo de tempo apresentado

Quadro 4: Condições de agitação marítima medidas entre Novembro e Dezembro de 2005 na proximidade da praia de Santa María del Mar

Data	Altura significativa de onda H_s [m]	Período de pico T_p [s]
12 a 17 Novembro	1,0	6
18 a 23 Novembro	1,5	10
24 a 25 Novembro	0,5	6
26 a 27 Novembro	1,0	6
28 a 29 Novembro	0,5	12
30 Novembro a 1 Dezembro	1,0	12
2 a 3 Dezembro	3,0	8
4 a 5 Dezembro	1,0	10
6 a 10 Dezembro	0,5	12

4. MODELAÇÃO FÍSICA DO CASO DE ESTUDO

Neste capítulo apresentam-se os principais aspectos a considerar na modelação física da estrutura em estudo, tendo em conta o objectivo dos ensaios e o modo como foram realizados. Indica-se ainda as características da instalação experimental e a respectiva instrumentação, as condições de ensaio no que respeita aos níveis de maré e características de agitação marítima, a metodologia de ensaios e os resultados obtidos.

4.1 Objectivo dos ensaios

O conjunto de ensaios realizados teve como objectivo primário a avaliação de possíveis causas da instabilização das estruturas compostas por blocos submersos e da alteração do fundo contíguo às mesmas. Para tal fez-se a avaliação para condições de agitação semelhantes às que ocorreram em Santa Maria del Mar durante o período de monitorização e em que se verificou o afundamento dos blocos.

No que se refere aos materiais de fundo onde assentavam as estruturas, dado que a estrutura 3 foi colocada sobre um manto de gravilha e as estruturas 1 e 2 directamente sobre o fundo arenoso, foram realizados ensaios com a estrutura assente directamente no fundo e sobre um manto de gravilha. Desta forma, foi possível efectuar a comparação das alterações provocadas na estrutura e fundo adjacente para as mesmas condições de agitação, mas com a estrutura assente em fundos com características diferentes.

4.2 Escala do modelo

Tal como referido, o modelo físico reproduziu, à escala reduzida, uma estrutura semelhante às colocadas em Santa Maria del Mar.

A escolha da escala geométrica é feita comparando as condições de agitação e os níveis de água a reproduzir com as capacidades do equipamento disponível, em particular do batedor e as dimensões da instalação experimental disponível para o estudo, concretamente a profundidade de água máxima do tanque ou canal onde se realiza o estudo. Estas são as principais características que condicionam a escala geométrica a adoptar.

A escala geométrica de 1:20 foi a escolhida neste caso de estudo, devido ao facto do tanque requerer uma profundidade máxima de água de 64 cm e o batedor, para essa profundidade, ter limitações relativas às condições de agitação a simular. Foi estudada a possibilidade de utilizar a escala de 1:10 e de 1:15, mas os valores de profundidade, altura de onda significativa e período de pico das ondas a simular excediam os valores máximos possíveis de serem gerados pelo batedor.

No Quadro 5 apresenta-se o valor das escalas de tempo, geométrica e das escalas utilizadas para o posterior cálculo da massa dos blocos e do enrocamento no modelo, considerando a condição de semelhança de Froude (ver Quadro 2) e a semelhança do número de estabilidade (equação 6).

Quadro 5: Escalas e respectivos valores para o caso de estudo

Parâmetro	Semelhança	Escala	Valor
Tempo	Froude	λ_T	4,47
Geométrica		λ_L	20
Massa volúmica da água		$\lambda_{\rho,w}$	1,025
Massa volúmica dos blocos		$\lambda_{\rho,b}$	1
Massa		λ_M	8000
	Nº de estabilidade	λ_M	9321
Densidade relativa		λ_Δ	0,958

No Quadro 6 apresentam-se as condições de agitação à escala do modelo utilizados nos ensaios, calculados a partir do valor de escala apresentada no Quadro 5 e dos valores em protótipo, apresentados no Quadro 4. Apresentam-se ainda os níveis de maré, o número de ensaios realizados para cada condição de agitação e a duração do ensaio.

Os ensaios foram realizados com ondas irregulares com uma configuração espectral empírica de JONSWAP, com um parâmetro de esbelteza de 2,2, correspondente às características em protótipo (Muñoz-Perez *et al.*, 2015) cuja duração de actuação no modelo, 24 minutos, corresponde a aproximadamente 2 horas no protótipo. Os ensaios realizados consistiam na repetição de séries de 24 minutos, o que gerou ensaios com durações de 48, 144 e 180 minutos.

Salienta-se o facto das condições de agitação realizadas no primeiro grupo de ensaios, baixa-mar, não terem sido repetidas no grupo seguinte, com preia-mar. Esta alteração foi definida aquando dos ensaios, visto que, para determinadas condições de agitação, não se verificou qualquer alteração, quer no fundo, quer nos blocos. Como o nível de maré de baixa-mar é mais desfavorável, não se tendo verificado alteração nestes casos, também não seria expectável que se verificasse em preia-mar, pelo que se optou pela não reprodução de algumas dessas condições.

Quadro 6: Níveis de maré e condições de agitação marítima ensaiadas no modelo

Grupo de ensaios	Condição de agitação	Duração [min]	Nível de maré	Altura significativa H_s [cm]	Período de pico T_p [s]
1	C1	144	Baixa-mar	5,0	1,34
	C2	144		7,5	2,24
	C3	48		2,5	1,34
	C4	48		5	1,34
	C5a	48		2,5	2,68
	C6	48		5	2,68
	C7	48		15	1,79
	C8	48		5	2,24
	C5b	180		2,5	2,68
2	C2	144	Preia-mar	7,5	2,24
	C3	48		2,5	1,34
	C8a	48		5	2,24
	C5	48		2,5	2,68
	C6	48		5	2,68
	C7	48		15	1,79
	C8b	48		5	2,24
3	C1	144	Baixa-mar	5	1,34
	C2	144		7,5	2,24
	C9	48		12,5	1,79

O Quadro 7 apresenta a profundidade de água no modelo, junto ao batedor e junto à estrutura, de acordo com o nível de maré ensaiado.

Quadro 7: Níveis de maré e respectivas profundidades

Nível de maré	Profundidade junto à estrutura [cm]	Profundidade junto ao batedor [cm]
Baixa-mar	15,0	46,1
Preia-mar	32,5	63,6

Os blocos no modelo eram de betão e possuíam uma massa volúmica, $\rho_{b,m} = 2400 \text{ kg/m}^3$, igual à sua massa volúmica no protótipo, $\rho_{b,p} = 2400 \text{ kg/m}^3$. No caso da estrutura 3, o enrocamento colocado na sua base, tinha uma massa volúmica, $\rho_{e,m} = 2650 \text{ kg/m}^3$, igual à massa volúmica no protótipo, $\rho_{e,p} = 2650 \text{ kg/m}^3$. A massa volúmica da água no modelo, água doce, era de $\rho_{w,m} = 1000 \text{ kg/m}^3$, ligeiramente inferior à da água salgada, $\rho_{w,p} = 1025 \text{ kg/m}^3$.

Assim, as massas dos blocos no modelo, M_m , são as que se apresentam no Quadro 8, juntamente com a respectiva massa no protótipo, M_p , tendo em conta as escalas de massas apresentada no Quadro 5, isto é, considerando a semelhança de Froude e a do número de estabilidade.

Quadro 8: Massa dos blocos no protótipo e massas no modelo por semelhança de Froude e por semelhança do nº de estabilidade

Massa do Protótipo [kg]	Massa do Modelo [kg]	
	Froude	Nº de Estabilidade
2429	0,304	0,261

Relativamente à estabilidade dos blocos, utilizou-se o número de estabilidade para o cálculo da massa dos blocos no modelo. A opção tomada deveu-se ao facto do objectivo do estudo ser a verificação da estabilidade dos blocos.

Para escalar os sedimentos deste caso real teve-se em conta o facto do escoamento ser oscilatório e do principal modo de transporte ser efectuado junto ao fundo. Neste caso, a semelhança a respeitar é a semelhança de Shields. Assim, determinou-se a escala do peso volúmico submerso do sedimento e, tendo previamente o valor da escala geométrica e o diâmetro do sedimento no protótipo, foi possível o cálculo da escala de diâmetros, seguido do valor que se pretendia, o diâmetro do sedimento no modelo.

Nos quadros 9 e 10, apresentam-se os valores das escalas utilizadas no cálculo do diâmetro pretendido, assim como as características dos sedimentos, D_{50} e ρ_s , no modelo e no protótipo.

Quadro 9: Valores das escalas a considerar no Parâmetro adimensional de Shields

Escala	Valor
λ_{s-1}	3,65
$\lambda_{D_{50}}$	0,11

Quadro 10: Diâmetro e massa volúmica do sedimento no protótipo e no modelo

CARACTERÍSTICAS DOS SEDIMENTOS		
	Valor no Protótipo	Valor no Modelo
Massa Volúmica [kg/m ³]	2650	1434
Diâmetro característico ideal [mm]	0,25	2,23
Diâmetro característico utilizado [mm]	0,25	1,60

No Quadro 10, o valor do diâmetro no modelo é superior ao do protótipo, em contraste com a massa volúmica. Estas diferenças devem-se ao facto da escolha do sedimento do modelo ter sido a pedra-pomes, já que se pretendia que o Número de Shields do modelo se aproximasse do Número de Shields do caso real, de forma a reproduzir o melhor possível o transporte de sedimentos de fundo. Também devido à proximidade do Número de Shields entre o modelo e o protótipo, o diâmetro característico utilizado é inferior ao ideal.

Como foi referido no caso de estudo, a estrutura que assentava sobre uma camada enrocamento atingiu uma profundidade próxima das restantes, embora a sua velocidade de afundamento tenha sido menor. Concluiu-se que o fenómeno se deveu às reduzidas dimensões de granulometria e espessura da camada de enrocamento. Assim, no modelo, este caso não foi escalado, tendo-se substituído o fundo por uma camada de gravilha de diâmetro e espessura superior ao utilizado no protótipo (à escala do modelo), a fim de verificar se a instabilização dos blocos era uma consequência da instabilização do fundo. Para tal, o diâmetro mediano da granulometria da gravilha utilizado foi de $D_{50} = 2$ cm, para o qual não se esperava movimento no fundo, já que o Número de Shields era inferior ao crítico para as condições de agitação ensaiadas.

4.3 Caracterização do movimento

Para a determinação da existência ou não de movimento sedimentar efectuou-se o cálculo do parâmetro adimensional do diâmetro do sedimento do modelo, D_* , através da equação (1) e, seguidamente, procedeu-se ao cálculo pretendido, θ_{cr} , presente na equação (2) e do respectivo Número de Shields para cada uma das condições de agitação ensaiadas.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as condições de agitação a ensaiar (ver Quadro 6) que correspondem às que ocorreram na Praia de Santa Maria del Mar aquando da instabilidade das estruturas. Nestas figuras apresentam-se os valores do Número de Shields, quer em valores de modelo, quer de protótipo e o seu valor crítico que corresponde a $\theta_{cr} = 0,023$. Os valores das abcissas de cada um dos gráficos referem-se às condições de agitação a ensaiar em baixa-mar (Figura 4.1) e em preia-mar (Figura 4.2). Para as condições de baixa-mar, grupo 1, apresentam-se nove valores já que se ensaiaram nove condições de agitação (ver Quadro 6). As condições de agitação ensaiadas para preia-mar foram seis, correspondentes ao grupo 2. O grupo 3, em termos de condições de agitação e nível de maré, é uma repetição de alguns casos do grupo 1, razão pela qual não é apresentado.

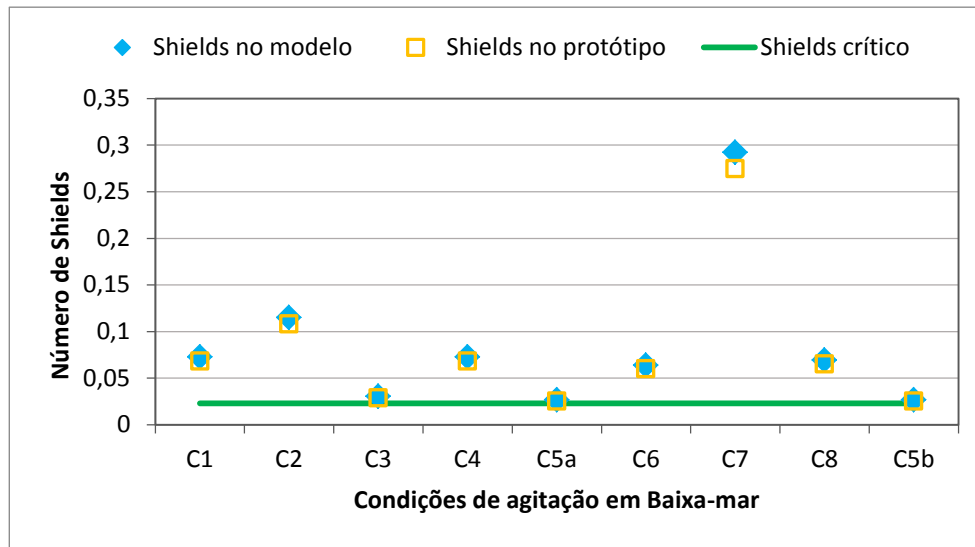


Figura 4.1: Comparação de valores do Número de Shields em Baixa-mar

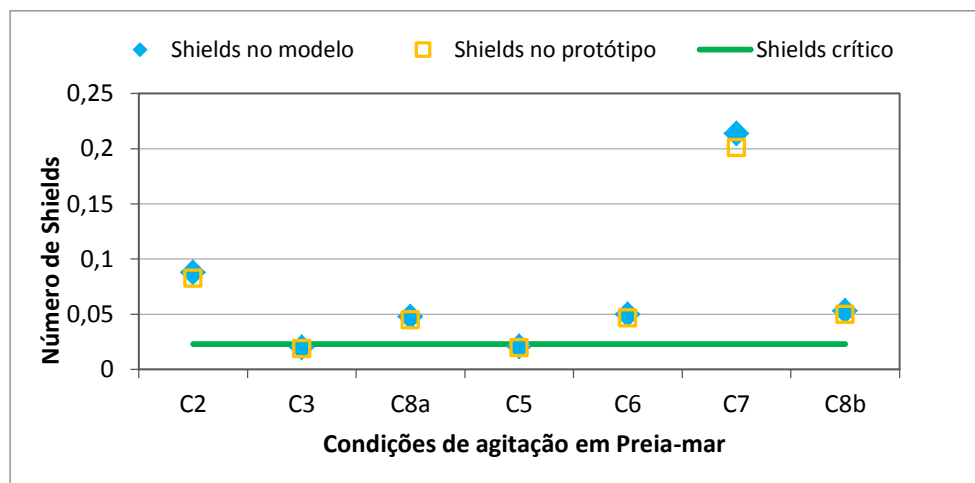


Figura 4.2: Comparação de valores do Número de Shields em Preia-mar

É observável que o valor crítico é inferior a quase todos dos valores de Shields das diferentes condições de agitação. Assim, conclui-se que será expectável a ocorrência de transporte sólido para as condições de agitação ensaiadas no modelo, excepto nas condições C3 e C5 que estão no limiar e, portanto, poderão não corresponder a condições de movimentação de sedimentos.

4.4 Instalação experimental e instrumentação

Os ensaios realizados no âmbito desta dissertação decorreram no Pavilhão de Hidráulica Marítima do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, onde se encontra a instalação experimental e o sistema de geração de ondas. Nesta instalação foi colocado o sistema de aquisição de dados e o sistema de obtenção de fotografias para posterior análise fotogramétrica.

O tanque onde foram realizados os ensaios sofreu alterações de modo a adaptar-se ao estudo, de acordo com a escala pretendida (Figura 4.3). Deste modo, foram construídas duas paredes laterais, que delimitaram uma área com um fundo de inclinação semelhante à do

protótipo, dentro do tanque existente, não se tendo modelado os esporões. O novo tanque tem 3 m de largura, 16,5 m de comprimento e profundidade máxima junto ao batedor de 64 cm.



Figura 4.3: Tanque finalizado

Numa das extremidades do tanque, foi colocado o sistema de geração de ondas, constituído por um batedor unidireccional (Figura 4.4).

O equipamento utilizado para aquisição das séries de dados de elevação de superfície livre era composto por quatro sondas resistivas, estando uma delas posicionada junto ao batedor e as outras três colineares e a cerca de 8,5 m do batedor e a 1,0 m da estrutura, com um espaçamento de 30 cm entre si (Figura 4.4). As três sondas colineares e perpendiculares à direcção de propagação das ondas, tinham como principal objectivo verificar possíveis efeitos tridimensionais na instalação que, caso existissem, deveriam ser tidos em conta na análise de resultados.

O objectivo das sondas era medir a variação da elevação da superfície livre da água ao longo do tempo, permitindo desta forma obter as características de agitação marítima, período de pico e altura significativa de onda.



Figura 4.4: Batedor (esquerda), localização do batedor e das sondas (direita)

O sistema de fotogrametria era composto por duas máquinas fotográficas digitais, modelo Canon EOS 600D com distância focal de 35 mm e 18 megapixels, colocadas numa estrutura metálica soldada à ponte rolante do tanque (Figura 4.5). Esta estrutura permitia que as câmaras ficassem sobre o quebra-mar submerso, a uma distância vertical de cerca de 2 m, de modo que, ao dispararem, as imagens obtidas englobassem toda a estrutura marítima e a área contígua de sedimento com cerca de $60 \times 30 \text{ cm}^2$, a sotamar. A técnica referida permitiu obter a

batimetria de cada ensaio e a posição dos blocos que compõe a estrutura submersa na zona abrangida pelas fotografias.



Figura 4.6: Câmaras fotográficas colocadas no suporte metálico

Para o levantamento da cota de alguns pontos dos blocos e do fundo, foi utilizado um hidrómetro que permitiu a medição manual de pontos relevantes. Este hidrómetro estava colocado numa estrutura metálica móvel que permitia deslocamentos em x e y, de modo a que se fizesse o levantamento de cotas nas coordenadas pretendidas (Figura 4.6).

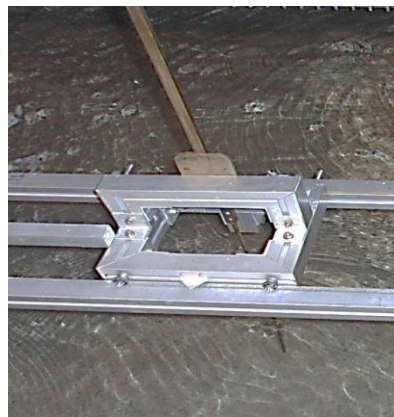


Figura 4.5: Hidrómetro utilizado no levantamento de cotas

A colocação do sedimento que compõe o fundo, Figura 4.7, foi executada de forma a resultar uma superfície homogênea com um ângulo de $1,69^\circ$, com altura máxima na extremidade oposta ao batedor e 10 cm de espessura sob a estrutura.



Figura 4.7: Tanque com sedimento devidamente colocado

Seguidamente, dispôs-se sobre o fundo, a 9,5 m do batedor e a meia largura do tanque, os blocos previamente construídos e pintados (Figura 4.8), identificados e ligados através de elásticos.



Figura 4.8: Construção e pintura dos blocos

A simulação das estruturas 1 e 2 do caso de estudo foi executada com a colocação da estrutura directamente sobre o fundo arenoso, ocupando uma base total de $(65 \times 37,5) \text{ cm}^2$ (Figura 4.9).



Figura 4.9: Estrutura 1 e 2

A estrutura 3 do modelo, que assentava sobre um manto de gravilha, contemplou a colocação de uma camada de gravilha de 6 cm e com diâmetro mediano, $D_{50} = 2 \text{ cm}$, sob a estrutura que servia de fundação para mesma. Em termos de geometria, foram retirados os blocos triangulares de cada extremo, de modo a respeitar a geometria no protótipo (Figura 4.10).



Figura 4.10: Estrutura 3

A referida camada de gravilha, tinha dimensões superiores às utilizadas no protótipo, à escala do modelo, para que se obtivesse uma fundação estável para a estrutura, a fim de verificar se a erosão no fundo e o deslocamento dos blocos estavam relacionados. De modo a evitar fenómenos de erosão que instabilizassem a estrutura, colocou-se a camada de gravilha ao longo de 50 cm a sotamar da estrutura, já que era a zona onde, no protótipo, se observou maior erosão.

O cálculo do diâmetro mediano da gravilha foi escolhido de forma a verificar que o Número de Shields para as condições de agitação deste grupo de ensaios se mantinha inferior ao valor de Shields crítico. O diâmetro mínimo de cálculo era de 5 mm e o material disponível no LNEC era de 2 cm. Como o objectivo era verificar a estabilidade da estrutura e não o diâmetro mínimo para o qual se tornava estável, utilizou-se gravilha de 2 cm de diâmetro mediano.

O Quadro 11 resume as características do fundo definidas para cada grupo de ensaios.

Quadro 11: Estrutura e fundo adjacente de cada grupo de ensaios

Grupo de ensaios	Estrutura e fundo adjacente
1 e 2	Estrutura 1 (protótipo) assente directamente no fundo
3	Estrutura 3 (protótipo) assente em gravilha de $D_{50}=2$ cm

A Figura 4.11 ilustra o perfil transversal do tanque de ensaios, sendo que o nível de maré representado como P.M., corresponde a preia-mar e o respectivo valor da profundidade junto ao batedor é de 0,636 m. O nível de maré representado como B.M. corresponde a baixa-mar, de profundidade 0,461 m junto ao batedor.

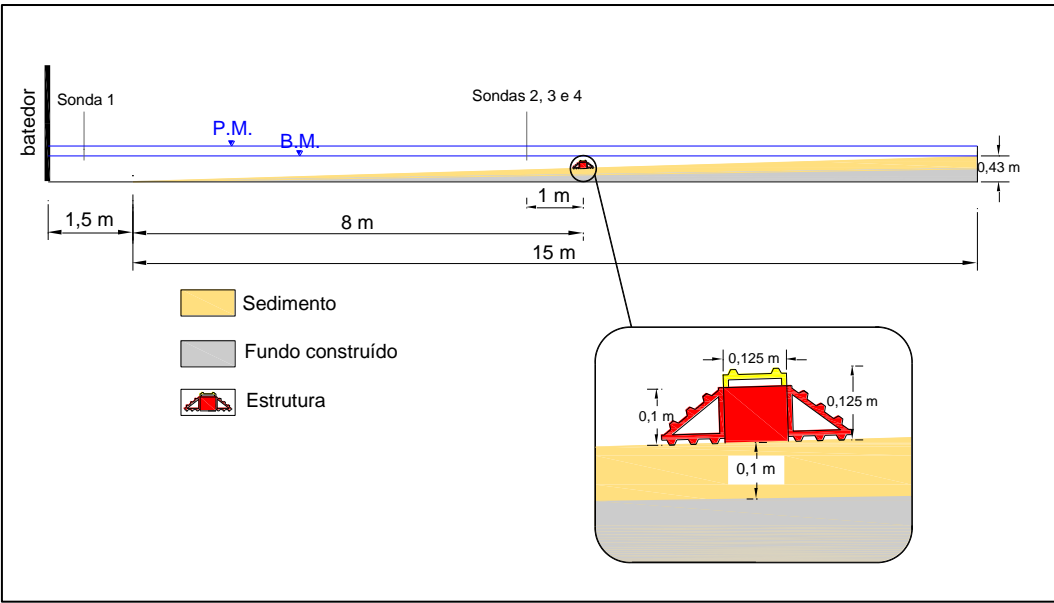


Figura 4.11: Desenho esquemático do perfil do tanque

4.5 Metodologia de ensaios

O conjunto de ensaios realizado compreendeu três grupos de ensaios, sendo o primeiro referente à estrutura 1 (Figura 3.2) e ao nível de baixa-mar, o segundo à estrutura 1 e ao nível de preia-mar e o terceiro à estrutura 3, com gravilha na base e nas zonas adjacentes à estrutura e ao nível de baixa-mar.

Para um determinado nível de maré, ou seja, para cada grupo de ensaios, foram executados ensaios com diferentes condições de agitação e duração. Cada dia compreendeu mais do que um ensaio do mesmo grupo.

No início de cada grupo de ensaios foi necessário nivelar o fundo, para garantir a condição inicial de fundo plano e colocar a estrutura no seu local. Deste modo, com condições iniciais semelhantes, pode haver comparação de resultados.

Um dia de ensaios englobou um conjunto de procedimentos indispensáveis à sua correcta realização. Assim, cada dia era iniciado da seguinte forma:

- Verificação do nível de água através de um hidrómetro de ponta direita fixo numa parede do tanque (Figura 4.12);
- Calibração das sondas recorrendo ao *software SAM* (Capitão, 2002);
- Colocação das câmaras fotográficas no suporte;
- Calibração das câmaras para a fotogrametria, que consistiu em:
 - Obtenção de quinze fotografias com cada máquina, que incluíam um alvo de calibração (emerso);
 - Obtenção de uma fotografia de cada câmara, incluindo o alvo fixo flutuante;
- Ligação do batedor.

Após cada ensaio realizavam-se os procedimentos seguintes:

- Desligar o batedor;
- Guardar os dados medidos;
- Verificar e registar os valores de altura de onda significativa e período de pico da série obtida em cada sonda, através do *software SAM* (Capitão, 2002);
- Obter uma fotografia de cada câmara, com o alvo fixo flutuante;
- Medir a cota dos pontos pré-definidos, quer na estrutura quer no fundo.



Figura 4.12: Hidrómetro utilizado na verificação do nível de água do tanque

A medição de cotas através do hidrómetro incluiu pontos na estrutura e pontos no fundo. Em relação à estrutura, optou-se pela medição de dois pontos em cada bloco, um a barlar e outro a sotamar da mesma. Em relação ao levantamento do fundo junto à estrutura e a sotamar desta, fez-se a medição a meia largura dos triângulos de sotamar, a 0 cm (posição variável), 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm e 50 cm (ver Figura 4.13).

A zona abrangida pela fotogrametria não pôde ser tão abrangente quanto desejável, pois o aumento da zona abrangida implicaria uma redução indesejável da precisão dos resultados. No entanto, a área incluída foi a mais significativa em termos de erosão do fundo e movimentos da estrutura. Assim, a fotogrametria engloba toda a área da estrutura e uma zona de sedimento de cerca de $60 \times 30 \text{ cm}^2$.

A Figura 4.13 indica a zona abrangida pela fotogrametria e os pontos onde foi executado o levantamento manual, apenas relativa ao fundo. Na figura, os blocos surgem em posição aproximada sobre o gráfico, para melhor entendimento da localização dos pontos de medição.

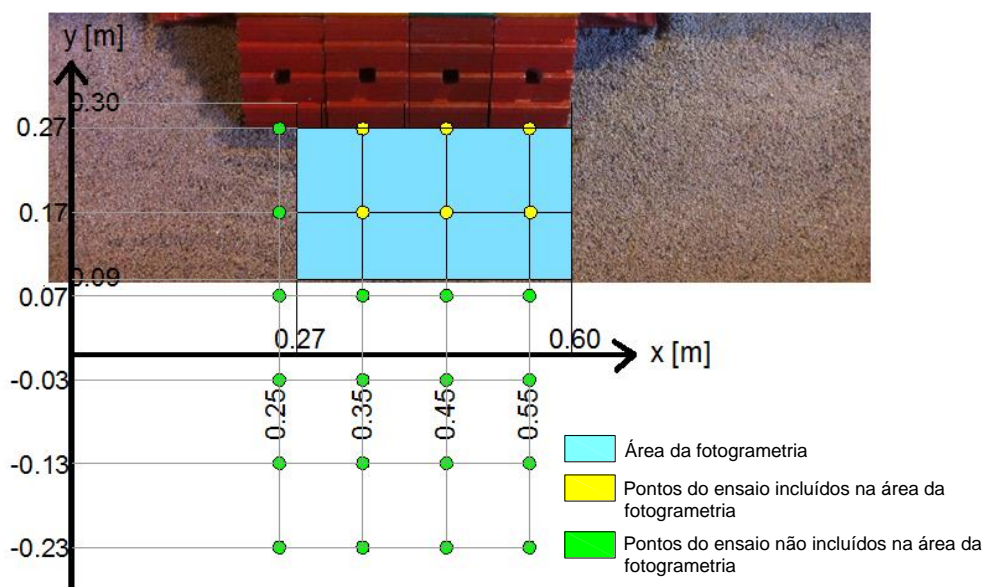


Figura 4.13: Levantamento do fundo com fotogrametria e manualmente

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Condições de agitação

As condições de agitação dos ensaios em modelo reduzido, apresentadas no Quadro 6 foram, como referido, baseadas nos valores medidos *in situ* na bóia de Cadiz.

Embora se tenham inserido as condições de geração no computador que controlava o batedor, as sondas estrategicamente posicionadas determinaram as reais condições a que se sujeitou o modelo (Anexo A).

Como foi referido anteriormente, a sonda 1 foi colocada próxima do batedor e as sondas 2, 3 e 4 colocadas paralelamente entre si e a 1 m da estrutura.

A diferença de valores entre sondas não excedeu os 4,5%, quer para H_s quer para T_p , o que permite verificar que as ondas tinham, até à proximidade da estrutura, um comportamento bidimensional, isto é, a frente de onda mantinha-se paralela ao canal. Em alguns ensaios pontuais observaram-se erros maiores, devido a algumas das sondas colineares não funcionaram adequadamente, pelo que os resultados foram retirados da análise.

Com o intuito de examinar a alteração da altura significativa de onda desde uma posição próxima do batedor até próximo da estrutura, apresenta-se na Figura 5.1 e na Figura 5.2 a comparação da média de H_s nas três sondas próximas da estrutura com H_s na sonda localizada logo após a geração da onda (Anexo A).

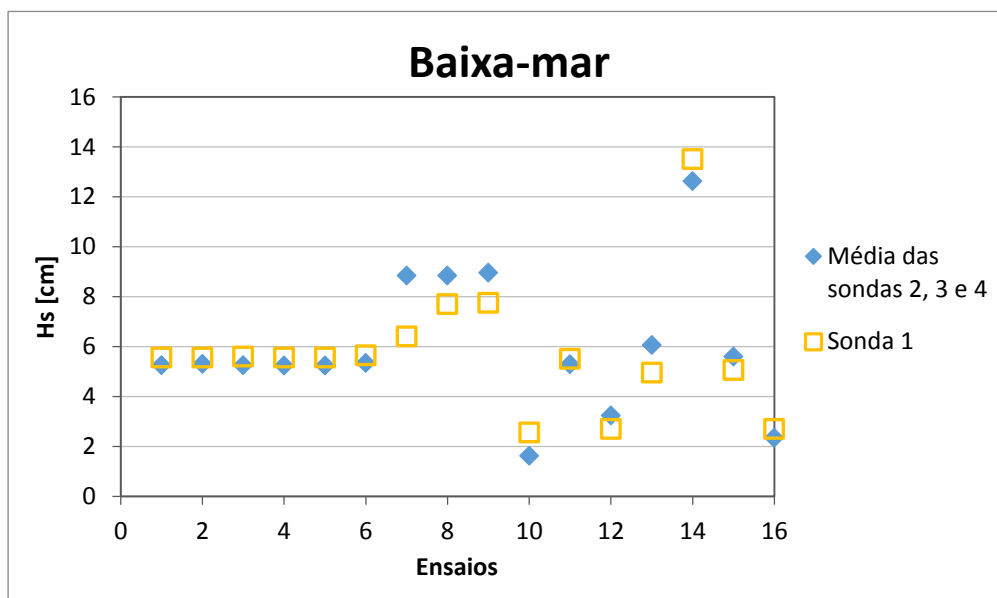


Figura 5.1: Sobreposição das alturas significativas de onda registadas pelas sondas próximas da estrutura e pela sonda próxima do batedor

Observando a figura relativa a baixa-mar, verifica-se que nos ensaios 7, 8 e 9, referentes à condição de agitação C2 e no ensaio 13, referente à condição C6, existe empolamento da onda, já que a sua altura significativa junto da estrutura é superior à altura à saída do batedor.

Nos restantes, a diferença de H_s entre os valores no batedor e próximo da estrutura é muito pequena, inferior a 4%.

A condição de tempestade é representada pelo ensaio 14, onde se verifica na sonda 1 uma altura significativa de onda muito superior a qualquer outro ensaio. No entanto, devido à rebentação de ondas que se verificou entre o batedor e a estrutura, a sua altura à saída do batedor é superior à altura junto da estrutura. Por esta razão, nos ensaios de baixa-mar com gravilha, diminuiu-se a altura significativa de onda em 2,5 cm (Quadro 6), para reduzir a rebentação das ondas antes de alcançarem a estrutura.

Com o nível de maré de preia-mar (Figura 5.2), sendo a profundidade superior à de baixa-mar, a ocorrência de fenómenos de rebentação e empolamento são menores. No entanto, em condições de tempestade (ensaios 23 e 24), existe uma ligeira diminuição da altura de onda significativa desde a zona próxima da geração pelo batedor até a zona próxima da estrutura. Tal como em baixa-mar, mas com uma diferença de alturas muito menor, para a condição de agitação C2 (ensaio 17) verifica-se a ocorrência de empolamento e para as restantes condições a diferença de H_s é inferior a 2,5%.

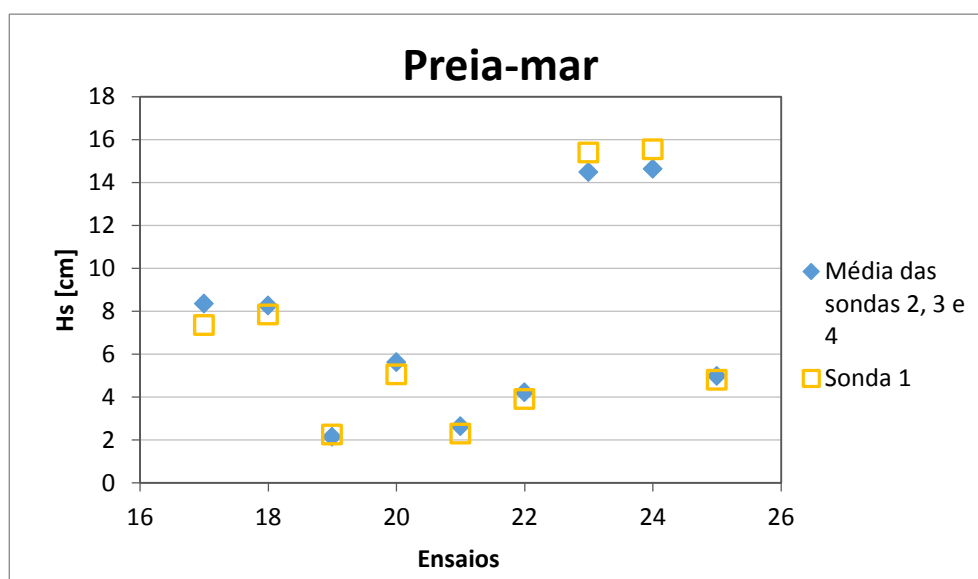


Figura 5.2: Sobreposição das alturas significativas de onda registadas pelas sondas próximas da estrutura e pela sonda próxima do batedor

Resumindo, para as condições de agitação com alturas significativas de onda intermédias (entre 1 m e 1,5 m), combinadas com períodos elevados (10 s a 15 s), verifica-se a ocorrência de empolamento, enquanto que para as condições de agitação de altura mais elevada ocorre rebentação antes da onda atingir a zona da estrutura.

5.2 Levantamento de cotas

5.2.1 Tratamento de imagens - Fotogrametria

A aplicação da fotogrametria em ensaios em modelo físico, tal como está descrito em 2.5, inclui todo o processo de aquisição e tratamento de imagens até à obtenção da reconstrução tridimensional da envolvente.

Finalizada a recolha de imagens, é necessário gravar os pares de fotografias com o mesmo nome, diferenciando-os apenas com “l” (*left*) e “r” (*right*) para que não existam dúvidas aquando da calibração.

A Figura 5.3 apresenta o levantamento de um par de imagens obtidas no mesmo instante, uma com a câmara da esquerda e outra com a da direita, com o alvo emerso, para efeitos de calibração.

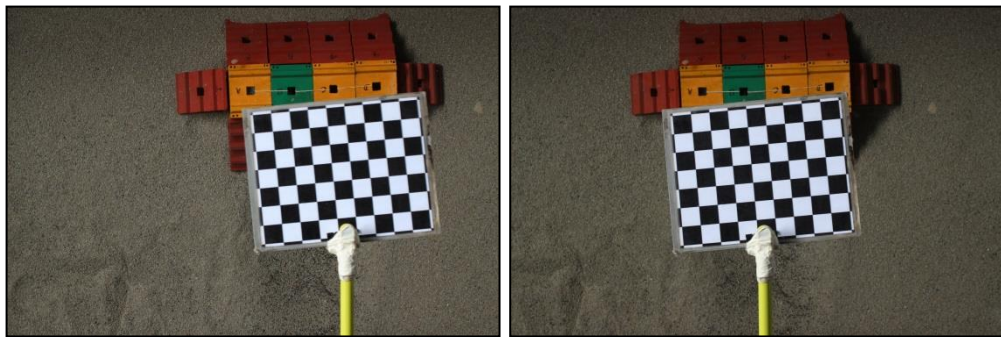


Figura 5.3: Par de imagens com alvo de calibração (emerso)

O processo de calibração consiste na identificação dos parâmetros das câmaras e sua posição perante o cenário observado. Cada vez que se inicia um novo dia de ensaios, a posição e orientação das câmaras pode variar, em resultado de uma ligeira mudança na posição das mesmas relativamente ao objecto fotografado. É, pois, recomendado que para cada dia seja feita uma calibração.

Este processo é executado computacionalmente através da abertura das imagens na aplicação MATLAB “camara_calib_gui.exe” (Ferreira *et al.*, 2006), programa utilizado no LNEC, e da marcação de quatro pontos, correspondentes aos cantos do alvo emerso, sendo que o primeiro ponto corresponde à origem do referencial (Figura 5.4). Este processo repete-se tantas vezes quantas imagens existirem e inclui alvos emersos e flutuantes. No fim da calibração, para cada par de imagens (esquerda e direita), obtém-se um arquivo que contém os parâmetros da câmara. Os arquivos referentes aos pares de imagens com alvo submerso são usados no processo de reconstrução.

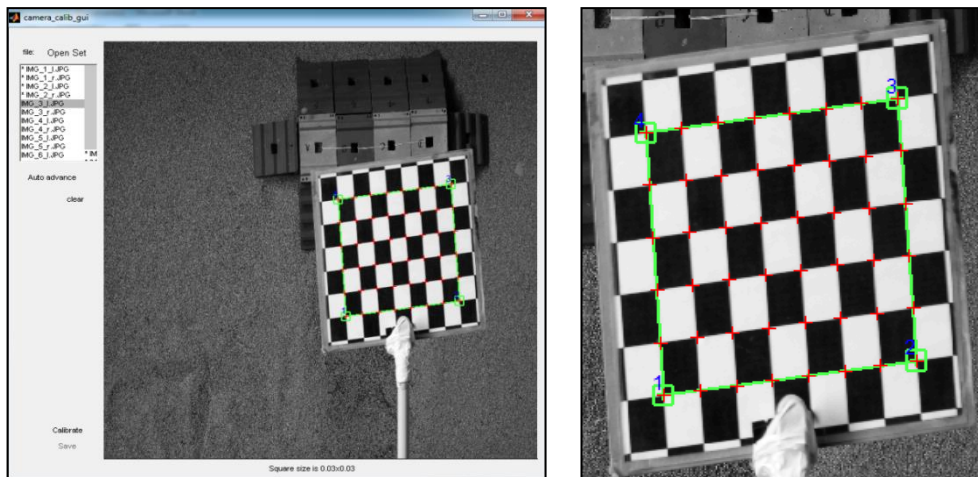


Figura 5.4: Selecção dos pontos correspondentes aos cantos internos do alvo de calibração

Com o alvo flutuante, que permite determinar o nível da água ($z = 0$), é possível reconstruir as imagens considerando a envolvente emersa e submersa, corrigindo os efeitos da refração da luz na água na parte submersa.

O procedimento para a reconstrução inicia-se abrindo, na aplicação MATLAB “reconstruct_gui.exe” (Ferreira *et al.*, 2006), os pares de imagens que contêm o alvo flutuante, o fundo e a estrutura. A aplicação reconstrói os pares de imagens e devolve um ficheiro MATLAB com as coordenadas (x, y, z) de pontos na zona em estudo. A Figura 5.5 apresenta a imagem da câmara esquerda e a da direita, estando a imagem obtida após a reconstrução, representativa da área reconstruída com todos os pontos (x, y, z), na Figura 5.6.

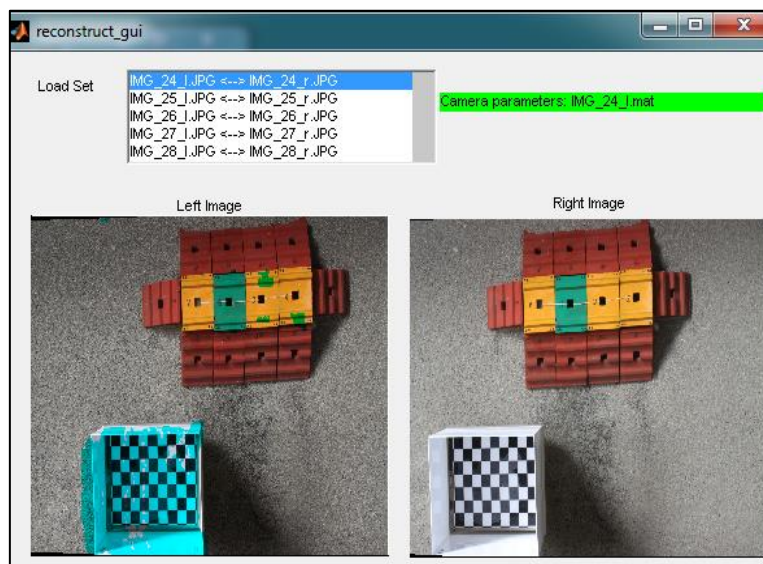


Figura 5.5: Reconstrução de um par de imagens submersas

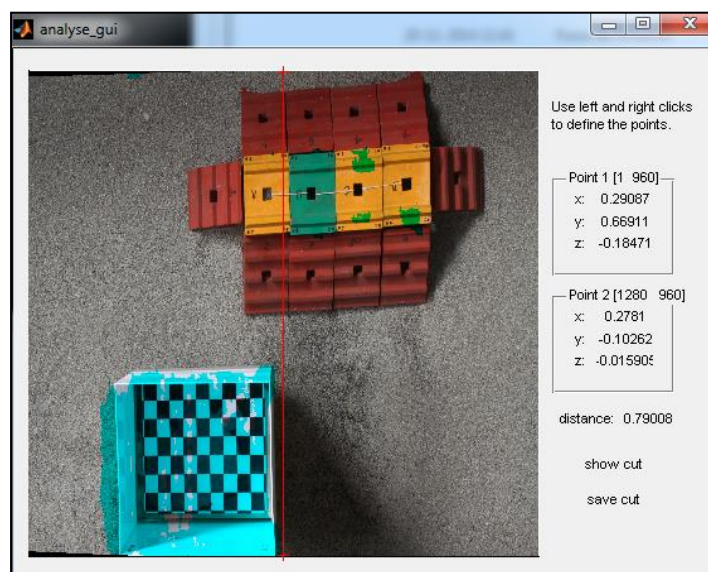


Figura 5.6: Identificação do ponto de referência

Terminada a reconstrução, obtiveram-se ficheiros, denominados “ternosL (“ternosL1.dat” a “ternosL31.dat”) das 31 reconstruções consideradas. Note-se que foram realizados 28 ensaios e obtidos pares de imagens no início de cada dia e após cada ensaio. Assim, o último par de imagens adquirido no fim de cada dia e o primeiro par do dia seguinte correspondiam ao fim do mesmo ensaio mas a reconstruções diferentes, pelo que se obtiveram mais reconstruções do que ensaios. Por outro lado, como se refere mais adiante neste capítulo, não foi possível reconstruir todos os pares de imagens, resultando as 31 reconstruções mencionadas.

Como, no caso em estudo, o alvo flutuante era movível, porque tinha de ser retirado enquanto os ensaios estavam a decorrer para não interferir com as ondas, não foi possível garantir que a origem de cada par de imagens fosse exactamente a mesma em todos os ensaios. Embora se tenham feito marcas a indicar a localização da estrutura que continha o alvo para que o erro fosse o menor possível, a caixa onde o alvo estava introduzido tinha dimensões ligeiramente superiores ao mesmo, o que permitia pequenos deslocamentos laterais. Esta situação obrigou a que se fizessem correcções para que os pontos pudessem ser comparados de ensaio para ensaio. Assim, foram utilizadas as coordenadas de abcissas iguais a meia largura de cada imagem reconstruída e ordenadas iguais ao valor máximo de y, visto não ser possível a colocação de uma marca ou objecto dentro do tanque que servisse de referência fixa. Ou seja, como as câmaras fotográficas estavam posicionadas sempre no mesmo sítio, o valor de meia largura das imagens tinha de corresponder sempre ao mesmo ponto real.

A Figura 5.6 apresenta uma imagem da reconstrução numa aplicação de nome “analyse_gui.exe”, desenvolvida no LNEC. Esta aplicação permite determinar, com base nas imagens obtidas durante a calibração e os ensaios, as coordenadas (x, y, z) de cada ponto do domínio. Note-se que a possibilidade de encontrar o ponto de referência, (x, y), deve-se ao facto desse mesmo ponto ser identificado (*Point 1* na Figura 5.6), na abertura de cada reconstrução.

As correcções da origem foram efectuadas usando sempre como referência o ponto “*Point 1*” da primeira reconstrução, do primeiro dia de ensaios do respectivo grupo de ensaio. Esta correcção foi necessária por se terem obtido imagens de ensaios do mesmo grupo que decorreram em dias sucessivos. Assim, o valor da última reconstrução de um certo dia tinha de ser igual ao valor da primeira reconstrução do dia seguinte.

Para corrigir os valores dos ficheiros “*ternosL*” da fotogrametria, foi desenvolvido, no âmbito desta dissertação, um programa em MATLAB, “*Prog_zmin*” (Anexo B), onde se introduziram as correcções x e y de cada reconstrução e onde se definiu o domínio de estudo para que abrangesse a zona de fundo junto à estrutura e aos blocos, tal como o indicado na Figura 4.13. Este programa lia os ficheiros de dados “*ternosL*” e devolvia todos os pontos (x , y , z) do domínio definido, com as respectivas correcções. Deste modo, importando os valores dos pontos, foi possível verificar graficamente o comportamento do fundo e da estrutura ao longo dos ensaios.

No caso da fotogrametria, o levantamento de coordenadas dos blocos apenas foi executado para os blocos de secção quadrangular, já que foram estes que foram monitorizados em Santa Maria del Mar. Assim, através da aplicação “*analyse_gui.exe*” já mencionada, obtiveram-se as coordenadas (x , y , z) dos 16 pontos de cada reconstrução, 4 pontos por bloco. Os pontos, facilmente identificáveis na Figura 5.6, são de cor preta e com uma localização próxima dos vértices de cada bloco.

5.2.2 Resultados obtidos por fotogrametria

Os resultados que se apresentam referem-se aos valores de cotas dos blocos e da profundidade máxima do fundo ao longo de cada grupo de ensaios, considerando os três grupos realizados. Os resultados de cada método são apresentados separadamente na secção seguinte, estando primeiro o levantamento de coordenadas por fotogrametria seguido do levantamento manual e a sua análise comparativa.

Todos os valores da profundidade apresentados são negativos, pois optou-se por colocar o referencial da fotogrametria com a superfície livre como $z = 0$, com o eixo z positivo para cima. Assim, toda a parte submersa é negativa.

Recorde-se que os três grupos de ensaios estão definidos como:

- Grupo 1: Baixa-mar e estrutura assente em fundo composto por sedimento;
- Grupo 2: Preia-mar e estrutura assente em fundo composto por sedimento;
- Grupo 3: Baixa-mar e fundação da estrutura constituída por gravilha (enrocamento).

Para os resultados relativos ao levantamento por fotogrametria, são apresentadas as figuras ilustrativas das cotas mínimas do fundo (z_{min}) a sotamar da estrutura na zona em análise ao longo das reconstruções (Figura 4.13). O quadro que indica o valor mínimo das cotas do fundo (z_{min}) de cada reconstrução, condições de agitação, altura de água no tanque e duração

de ensaios encontra-se em anexo (Anexo C), apresentando-se aqui apenas os gráficos respectivos. Os resultados dos ensaios realizados no primeiro dia, correspondentes à condição de agitação C1 ($T_p=1,34$ s e $H_s=5$ cm), não foram considerados pois não foi possível realizar a reconstrução das imagens, por existirem impurezas a flutuar na água que alteravam as coordenadas obtidas por este método.

Os valores de z_{min} foram obtidos através do programa MATLAB “Prog_zmin”, onde foi introduzido um ciclo que, a partir dos ficheiros de dados de cada reconstrução (“ternosL”), determinava o respectivo valor mínimo de z na zona em estudo, ou seja, os valores de profundidade máxima do fundo a sotamar da estrutura.

Na observação de resultados verificou-se existirem alguns erros nas reconstruções 1, 24 e 26, citados e devidamente explicados na próxima secção, sendo esta a razão pela qual estas reconstruções não são apresentadas nas figuras que se seguem.

Nas Figuras 5.7 a 5.9 apresenta-se a cota máxima do fundo registada por fotogrametria nos ensaios dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente. Sobre a indicação das cotas apresenta-se a respectiva condição de agitação. Recorde-se que a condição inicial do fundo foi igual no início de todos os grupos de ensaios, que inicialmente tinha como valor de z_{min} de cerca de -18 cm.

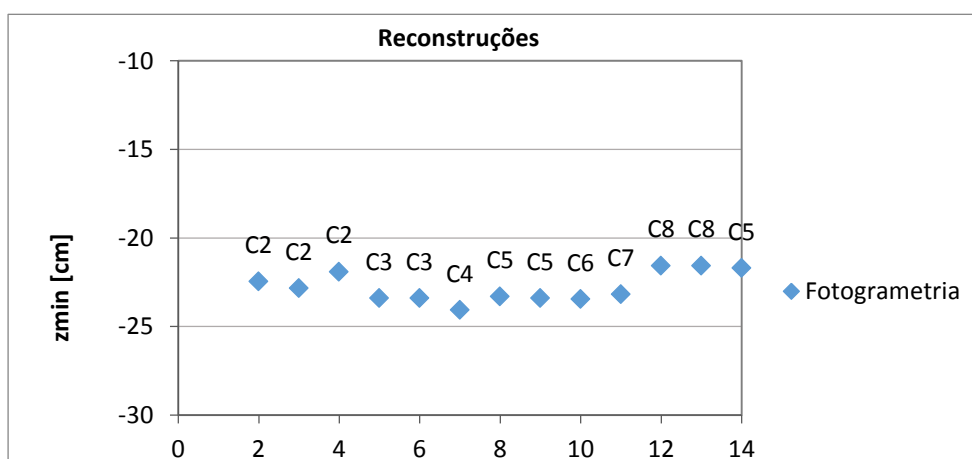


Figura 5.7: Cota mínima do fundo registada por fotogrametria nos ensaios do grupo 1 (Baixa-mar)

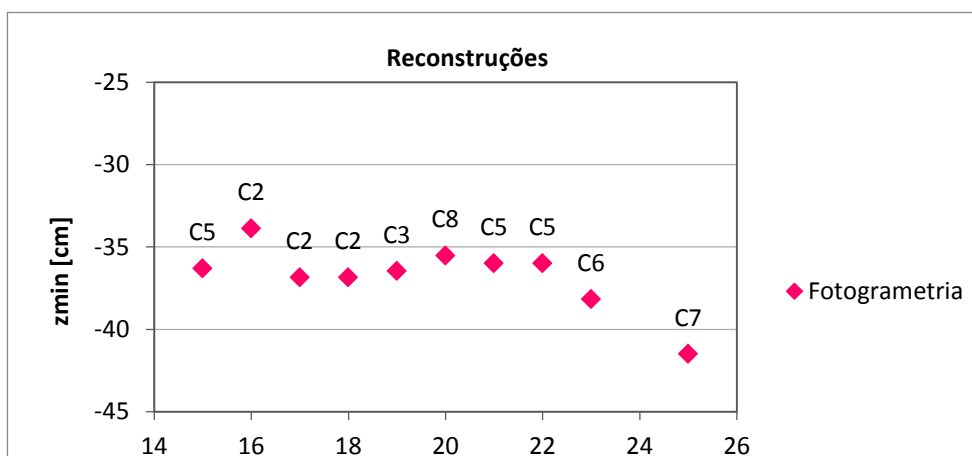


Figura 5.8: Cota mínima do fundo registada por fotogrametria nos ensaios do grupo 2 (Preia-mar)

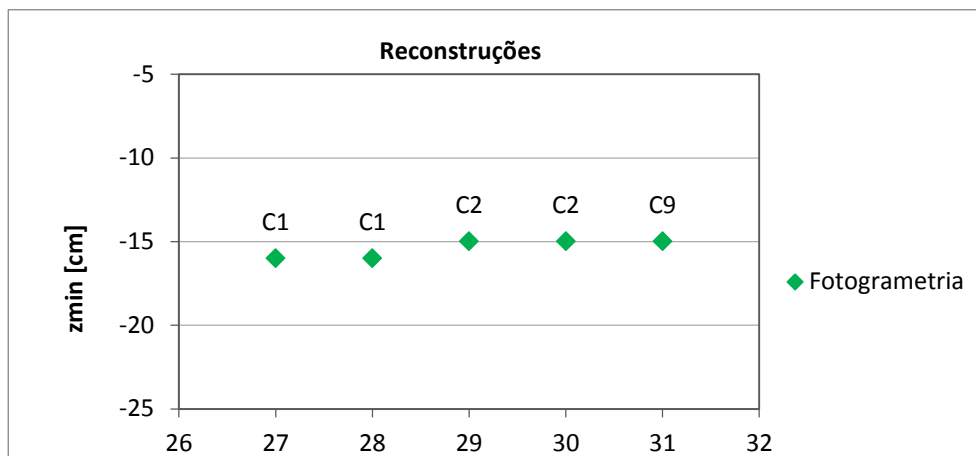


Figura 5.9: Cota mínima do fundo registrada por fotogrametria nos ensaios do grupo 3 (Baixa-mar e gravilha)

Verifica-se que, no primeiro grupo de ensaios, existe uma alteração do fundo entre as reconstruções 2 e 7, que varia entre erosão e deposição, até que ocorre uma relativa estabilização do fundo. No ensaio que antecede a reconstrução 12, existe uma deposição com cerca de 1,6 cm, que se mantém constante até ao fim do grupo 1.

Relativamente ao grupo 2, verifica-se novamente algumas alterações inconstantes do fundo até à reconstrução 22. A partir desta, são sucessivos os fenómenos de erosão verificados, nomeadamente na última reconstrução, em que a cota diminui substancialmente (5,5 cm).

Nos ensaios em que a estrutura assentava directamente no fundo sedimentar, verificou-se a formação de uma cavidade erosiva, a cerca de 50 cm a sotamar da estrutura. Esta cavidade foi aumentando na direcção barlar, aproximando-se dos pés da estrutura.

O último grupo de ensaios tem variações menores, já que se trata do caso em que a zona mais propícia a fenómenos erosivos foi coberta por gravilha. Ainda assim, verifica-se a existência de deposição com 1 cm na reconstrução 29, que se mantém nos ensaios seguintes.

Comparando os valores entre grupos, facilmente se conclui que no grupo 3 ocorreu menor alteração do fundo que nos restantes grupos.

O nível de água entre os grupos 1 e 2 difere em 17,5 cm (Quadro 7). Nas reconstruções que antecedem a condição de agitação de tempestade (C7) do grupo 1 e do grupo 2, reconstrução 11 e 25, respectivamente, pode concluir-se que as diferenças entre máximos são de cerca de 13 a 14 cm, ou seja, menores que a diferença de nível. Verificando-se então que houve menor erosão nos ensaios do grupo 2.

Uma das vantagens da fotogrametria é a possibilidade de determinação de cotas e de visualização de superfícies. Como já se referiu anteriormente, a partir das reconstruções efectuadas são gerados todos os pontos (x, y, z) do domínio das imagens e, através do programa MATLAB "Prog_zmin", podem determinar-se as cotas de toda a área em estudo. O programa "Prog_zmin" permite representar graficamente as cotas do fundo no início e fim de cada grupo de ensaios através de uma superfície tridimensional com uma malha com uma definição de 5 mm em cada eixo.

As figuras 5.10 a 5.12 representam a superfície inicial e final do fundo, respectivamente, para cada grupo de ensaios. As figuras representativas das diferenças do fundo entre cada condição de agitação ensaiada e para os Grupos 1, 2 e 3 encontram-se nos Anexos G, H e I, respectivamente.

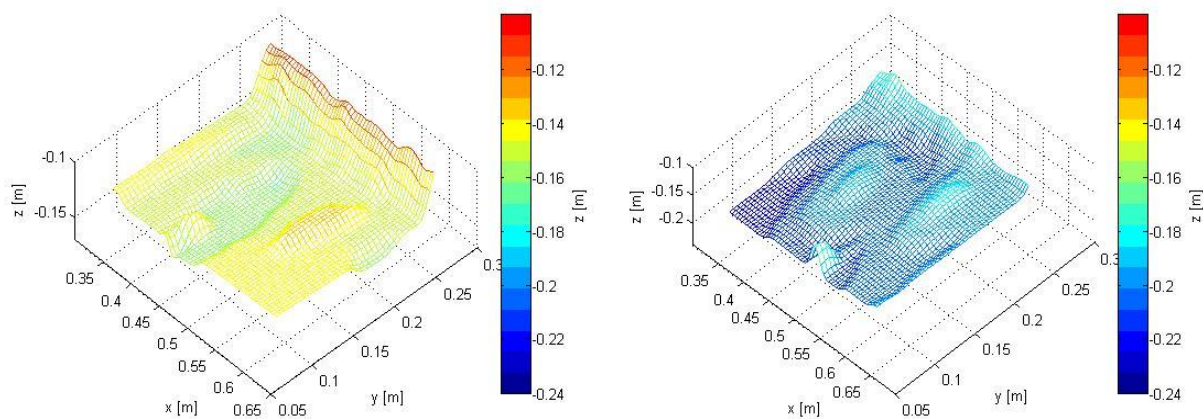


Figura 5.10: Superfície inicial (esquerda) e final (direita) do fundo do Grupo 1

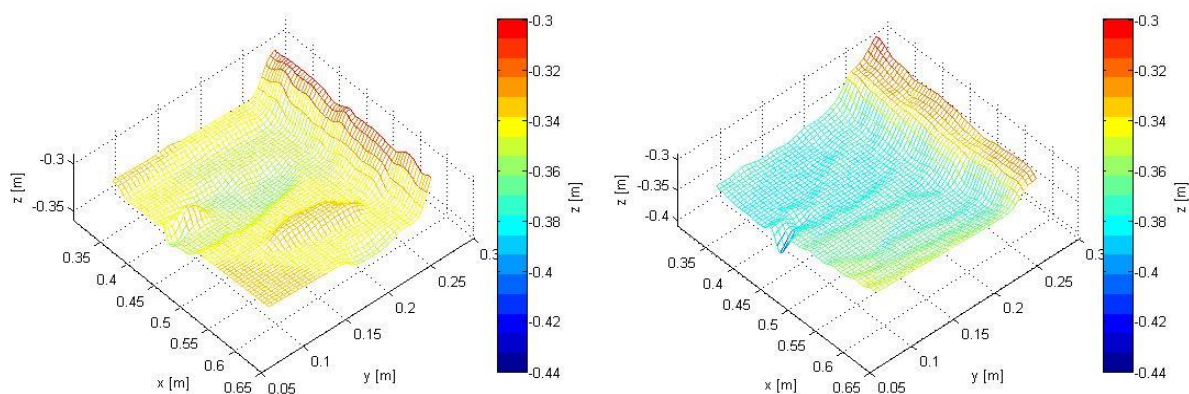


Figura 5.12: Superfície inicial (esquerda) e final (direita) do fundo do Grupo 2

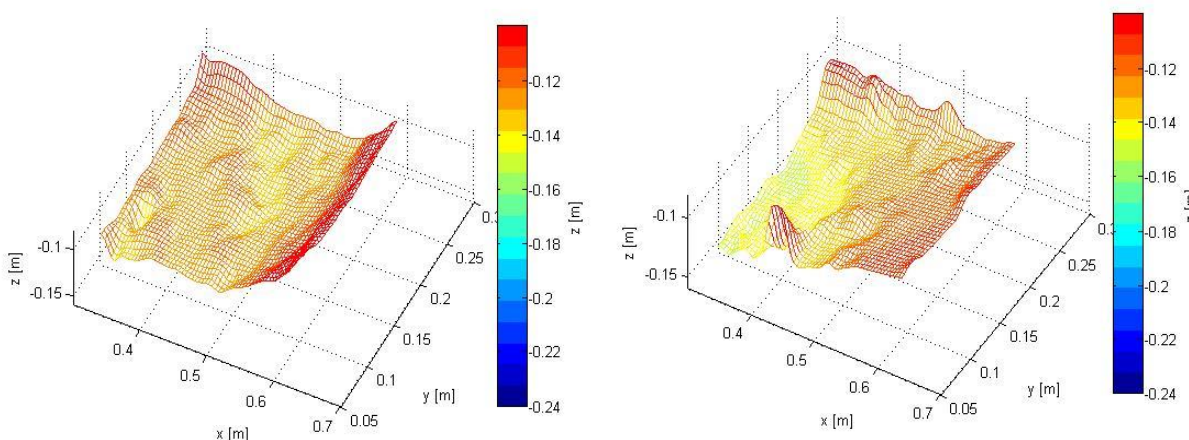


Figura 5.11: Superfície inicial (esquerda) e final (direita) do fundo do Grupo 3

Para que as imagens permitissem visualizar a alteração do fundo de forma clara, as figuras que contêm o fundo mostram a sotamar parte dos blocos triangulares, o que permite identificar a área onde se verificou maior erosão e/ou deposição de sedimentos.

Como referido, houve um problema na reconstrução das imagens correspondentes à condição de agitação C1. No entanto, o fundo inicial, anterior a qualquer ensaio, essencial para a verificação das alterações do fundo ao longo do grupo 1 é conhecido e corresponde ao fundo liso com declive constante.

Na Figura 5.10 (esquerda), representativa do fundo inicial, verifica-se que a superfície não é completamente lisa, existindo variações de cerca de 2 cm. As razões para este acontecimento podem estar relacionadas com a colocação da estrutura sobre o sedimento que, embora tenha sido executada com o máximo cuidado, pode ter alterado a superfície. Outra razão possível prende-se com o enchimento de água no tanque que poderá ter movimentado este sedimento de tão pequenas dimensões.

Por observação da Figura 5.10, verifica-se uma alteração acentuada da profundidade e da forma do fundo no início e fim dos ensaios do Grupo 1, com uma ocorrência de erosão em toda a área visualizada. A zona mais afectada pela erosão regista uma diferença máxima de cotas correspondente a cerca de 6 cm (Anexo G), apresentando valores de cota máxima negativa de cerca de 22 cm. Este valor vai ao encontro do valor referente à reconstrução 14, apresentado na Figura 5.7.

Observando a Figura 5.11, relativa aos ensaios do grupo 2, é notória a alteração de profundidade no final dos ensaios do Grupo 2, embora com menos intensidade do que o ocorrido no Grupo 1. A erosão verificada em toda a área é visível na figura, variando entre 2 a 3 cm (Anexo H). No entanto, existe um ponto máximo onde se regista uma diferença de cerca de 5 cm (para $x=0,425\text{m}$ e $y=0,095\text{ m}$). Esta diferença foi anteriormente verificada na Figura 5.8, quando se comparou a reconstrução 15 com a 25.

A Figura 5.12 revela menores alterações do fundo no Grupo 3 do que nos Grupos 1 e 2, já que se trata do grupo de ensaios em que a estrutura assentava sobre uma camada de 2 cm de gravilha. Devido a um erro de fotogrametria na primeira reconstrução deste grupo, a segunda reconstrução foi a utilizada para a comparação com a reconstrução final (Figura 5.12) e com a terceira reconstrução (Anexo I).

Comparando as profundidades no início e fim do ensaio (Figura 5.12), verifica-se a ocorrência de erosão nas zonas laterais da área representada, com valores de cerca de 1 cm, sendo que no centro e junto aos blocos não se verificam alterações significativas. A variação máxima entre a cota mínima registada na reconstrução 27 e na reconstrução 31, ver Figura 5.9, é precisamente de 1 cm, o mesmo valor que se observa na comparação das representações tridimensionais da Figura 5.12.

Nas Figuras 5.13 a 5.15 apresentam-se os valores de cota atingidos pelo bloco C e a condição de agitação respectiva ao longo das reconstruções, separados por grupo de ensaios. Ilustram-se apenas com os resultados referentes ao bloco C por ter sido um dos blocos que sofreu mais alterações.

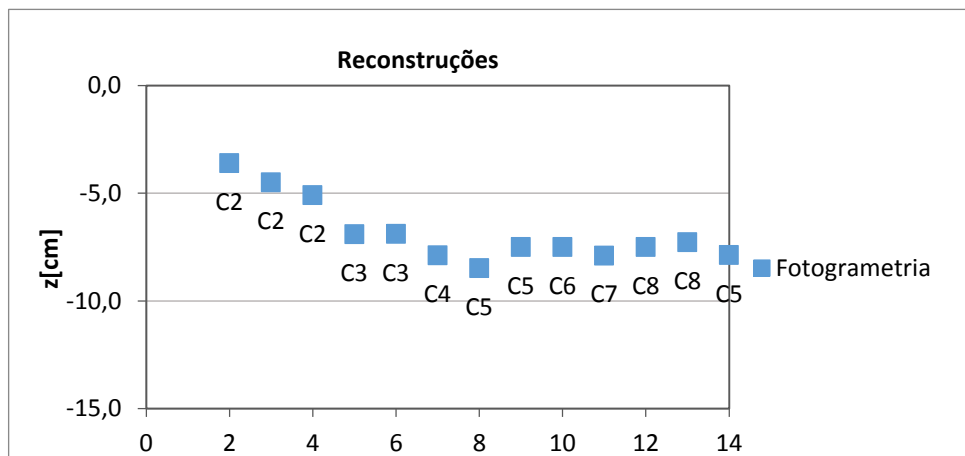


Figura 5.13: Valores de cota registados por fotogrametria do Bloco C ao longo do grupo 1 (Baixa-mar)

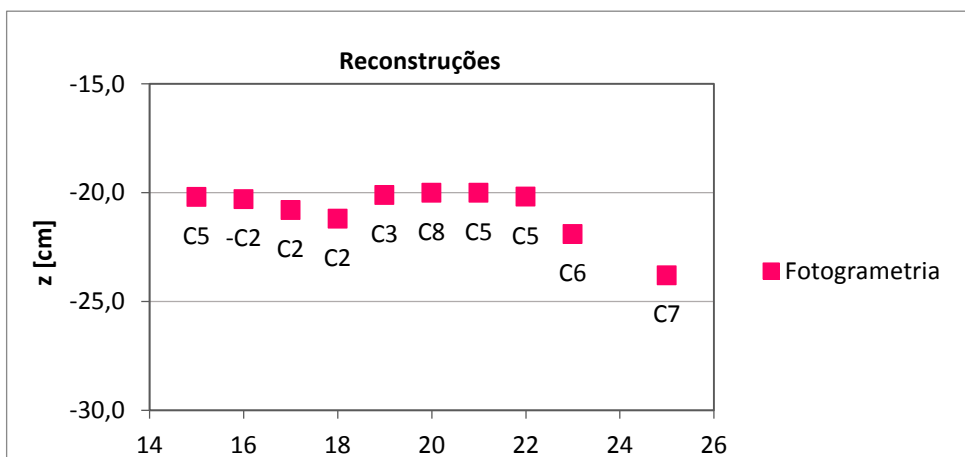


Figura 5.14: Valores de cota registados por fotogrametria do Bloco C ao longo do grupo 2 (Preia-mar)

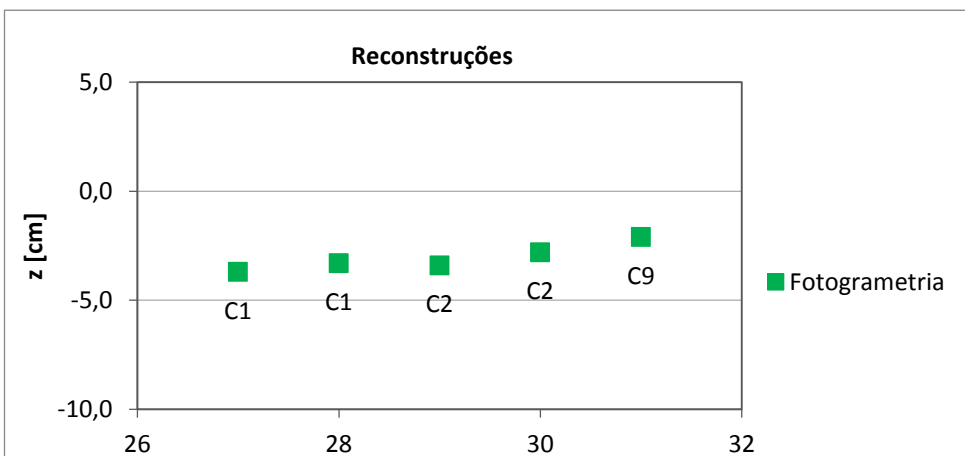


Figura 5.15: Valores de cota registados por fotogrametria do Bloco C ao longo do grupo 3 (Baixa-mar e gravilha)

Foi referido anteriormente que o levantamento por fotogrametria tinha sido executado em quatro cantos dos blocos, dois do lado de barlar e dois de sotamar. Já o levantamento de pontos manual foi realizado um a barlar e um a sotamar, no centro de cada bloco. Deste modo, para que os valores pudessem ser comparados, fez-se uma média dos respectivos pontos da fotogrametria. Assim, os pontos apresentados como “Valores de cota registados por fotogrametria do Bloco C” correspondem exactamente aos referidos valores médios. O facto de se apresentarem os resultados de sotamar deve-se a questões de simplicidade de apresentação de resultados, já que a diferença entre os dois lados não é significativa. O quadro do Anexo E contém toda a informação relativa aos quatro pontos de cada bloco.

Os blocos sofreram alterações muito distintas em cada grupo. No grupo 1, verifica-se um afundamento desde a reconstrução 2 até à 8, seguido de uma ligeira recuperação que mantém a sua cota quase constante até terminar o grupo de ensaios.

O grupo 2 não foi sujeito a tantas alterações, verificando-se alguma instabilidade inicial e no fim, a partir da reconstrução 22, uma acentuada descida de cota, provocada por erosão local.

O último grupo de ensaios, tal como verificado para as cotas mínimas do fundo, foi o que sofreu menor alteração. No entanto, termina o grupo de ensaios com uma cota superior à que iniciou, indiciando a emersão do bloco. Esta emersão não ocorreu, foi um erro de fotogrametria como se verá mais à frente.

No Anexo J encontram-se as figuras referentes à posição inicial e final dos blocos em cada um dos três grupos de ensaios realizados.

5.2.3 Resultados obtidos manualmente

As diferentes condições de agitação combinadas com os dois níveis de maré, baixa-mar (grupo 1) e preia-mar (grupo 2), tiveram diferentes repercussões na alteração do fundo junto à estrutura e nos deslocamentos dos blocos. Para analisar esse impacto, foi realizado um levantamento de cotas manual, quer dos blocos, quer do fundo a sotamar da estrutura, de forma a quantificar essas alterações e para posterior análise comparativa com os resultados da fotogrametria.

Os valores apresentados no Quadro 12 correspondem ao afundamento dos blocos, em que cada letra corresponde ao bloco identificado na Figura 4.9, calculados com base na cota inicial e final de cada ponto do bloco e a cota do fundo, após uma determinada condição de agitação. No terceiro grupo de ensaios verificou-se que a alteração das cotas quer dos blocos quer do fundo composto por gravilha era praticamente nula, razão pela qual os resultados deste grupo não são apresentados no Quadro 12.

Quadro 12: Levantamento de cotas após cada condição de agitação

Grupo de ensaios	Condição de agitação	Afundamento máximo acumulado dos blocos [cm]				Fundo [cm]	
		D	C	B	A	Prof. máxima	Prof. acumulada
1	C1	-0,6	-0,7	-0,7	-0,4	-4,1	-4,1
	C2	-2,5	-2,7	-2,6	-2,0	-3,4	-7,5
	C3		Sem alterações			+0,1	-7,4
	C4		Sem alterações			+0,3	-7,1
	C5a		Sem alterações			0,0	-7,1
	C6		Sem alterações			+0,3	-6,8
	C7	-2,8	-3,3	-3,0	-2,1	+0,4	-6,4
	C8		Sem alterações			+0,4	-6,0
	C5b		Sem alterações			0,0	-6,0
2	C2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-2,7	-2,7
	C3		Sem alterações			0	-2,7
	C8a		Sem alterações			+0,1	-2,6
	C5		Sem alterações			0,0	-2,6
	C6		Sem alterações			0,0	-2,6
	C7	-0,9	-2,3	-2,5	-1,3	-4,2	-6,8
	C8b		Sem alterações			-	-

À semelhança das figuras relativas aos resultados da fotogrametria, apresentam-se nas Figuras 5.16 a 5.18 os valores de cota mais profunda, z_{min} (manual), medida em cada ensaio manualmente, cujos valores e respectivas informações adicionais se encontram no Anexo D. Nas medições manuais, cada um dos valores apresentados corresponde a um dos pontos identificados na Figura 4.13 e sobre eles é indicada a condição de agitação que actuou antes do levantamento.

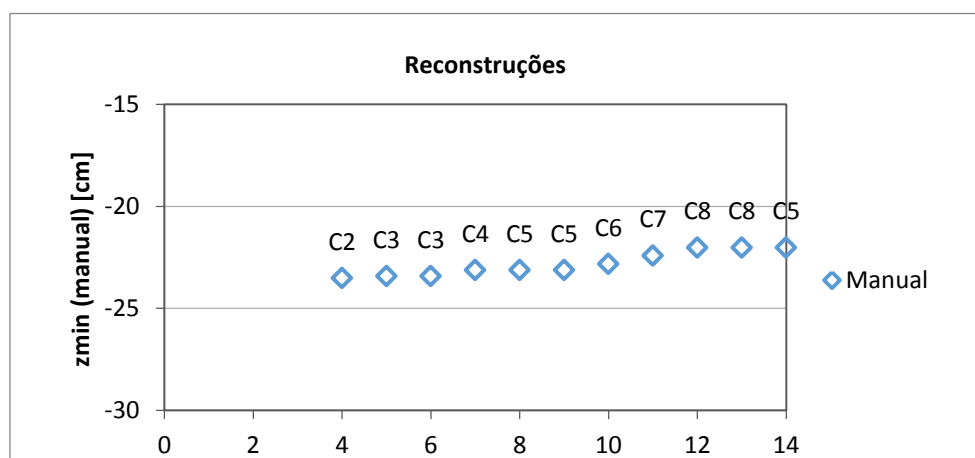


Figura 5.16: Cota mínima do fundo registada manualmente no grupo 1 (Baixa-mar)

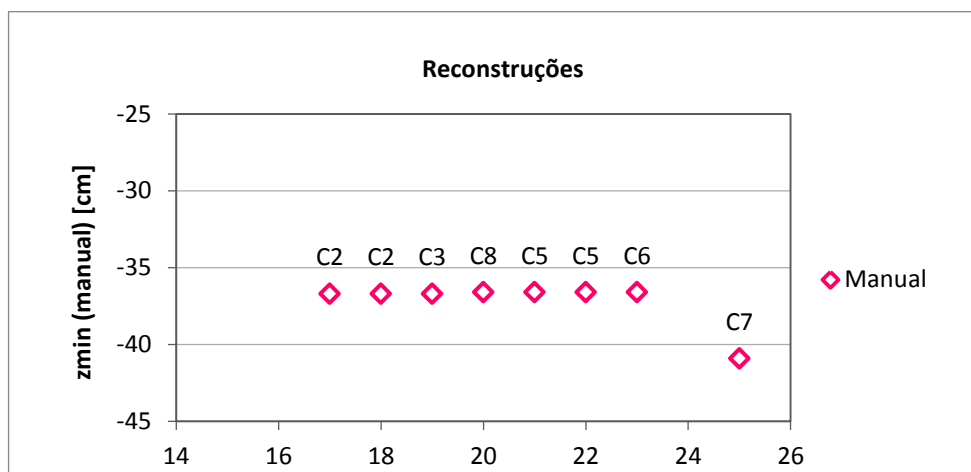


Figura 5.17: Cota mínima do fundo registada manualmente no grupo 2 (Preia-mar)

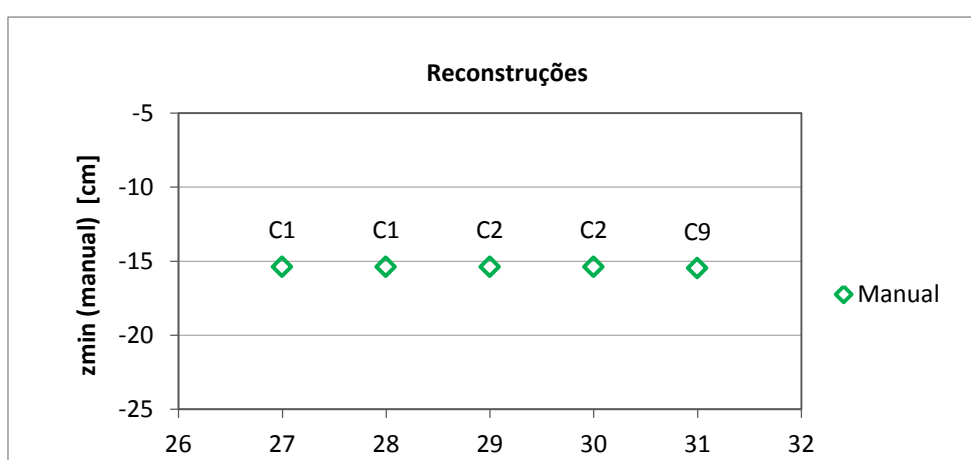


Figura 5.18: Cota mínima do fundo registada manualmente no grupo 3 (Baixa-mar e gravilha)

O fundo nos ensaios do grupo 1 foi alvo de pequenos fenómenos de erosão e deposição até à reconstrução 12, a partir da qual se mantém com a mesma cota até terminar o grupo de baixa-mar.

O fundo do grupo 2 mantém-se constante ao longo dos ensaios, até atingir a condição de tempestade que provoca uma erosão acentuada, verificada da reconstrução 23 para a 24. Este grupo, tal como se verificou na fotogrametria, foi o que registou a maior diferença de cotas do fundo entre o início e o fim dos ensaios.

No grupo 3 não são visíveis quaisquer alterações de fundo, pelo que este se manteve constante ao longo de todos os ensaios.

As Figuras 5.19 a 5.21 correspondem às cotas atingidas pelos blocos, resultantes das medições com recolha manual de dados. Tal como ocorreu na fotogrametria, a apresentação de valores é relativa apenas ao lado sotamar do bloco C. Os valores de cota registados em todos os blocos (A, B, C e D) são apresentados no Anexo F.

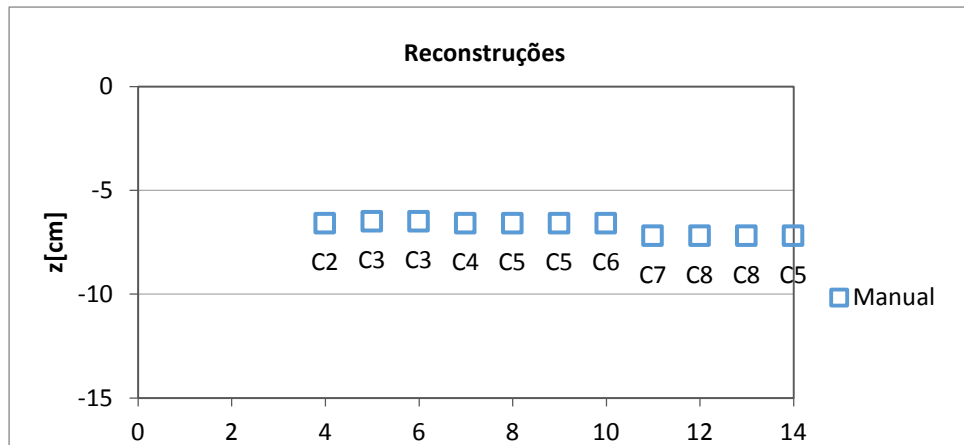


Figura 5.19: Valores de cota registados manualmente no Bloco C ao longo do grupo 1 (Baixa-mar)

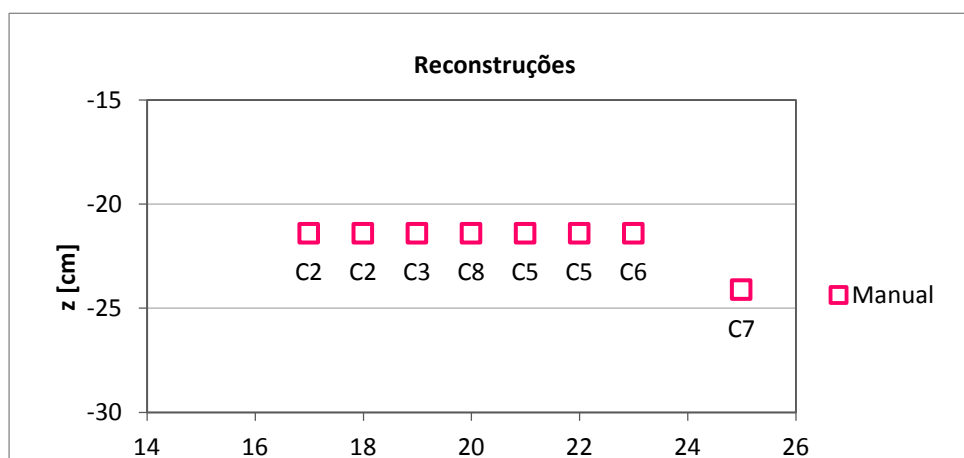


Figura 5.20: Valores de cota registados manualmente no Bloco C ao longo do grupo 2 (Preia-mar)

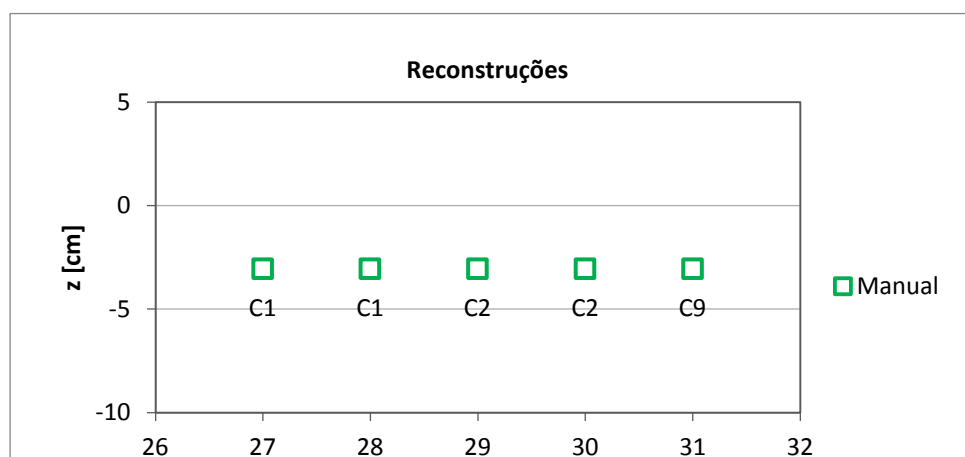


Figura 5.21: Valores de cota registados manualmente no Bloco C ao longo do grupo 3 (Baixa-mar e gravilha)

O registo de alteração de cotas nos blocos é pouco acentuado no primeiro grupo de ensaios, verificando-se uma ligeira diminuição do valor de cota na reconstrução 11, de 0,6 cm, mantendo-se depois a cota praticamente constante até ao fim.

Tal como se verificou na alteração do fundo, a cota do bloco C ao longo do grupo 2 é mantida sem alterações até à condição de agitação de tempestade (C7), onde se observa uma elevada alteração, de aproximadamente 2,5 cm. Também no grupo 3, as semelhanças com o registo de alteração do fundo são notórias, visto que a cota dos blocos não tem alterações ao longo do grupo de ensaios.

5.3 Análise comparativa entre resultados de levantamentos por fotogrametria e manualmente

A presente secção tem como objectivo a comparação e análise dos resultados obtidos em 5.2, isto é, a comparação entre medições de cotas do fundo a sotamar da estrutura e dos blocos efectuadas pelas técnicas de fotogrametria e levantamento manual com hidrómetro.

Inicia-se esta análise com a verificação da localização dos pontos de profundidade máxima, de forma a perceber se os pontos do levantamento por fotogrametria e os pontos de levantamento manual têm a mesma localização em planta.

Como referido, o programa MATLAB “Prog_zmin” permitia determinar as coordenadas (x, y) correspondentes a cada zmin do levantamento por fotogrametria. Deste modo, obtiveram-se as posições em planta de cada um dos valores de profundidade máxima, que são apresentadas na Figura 5.22. Para facilitar a análise da figura, cada grupo de ensaios está identificado com uma cor e cada ponto de levantamento tem indicação da reconstrução a que se refere.

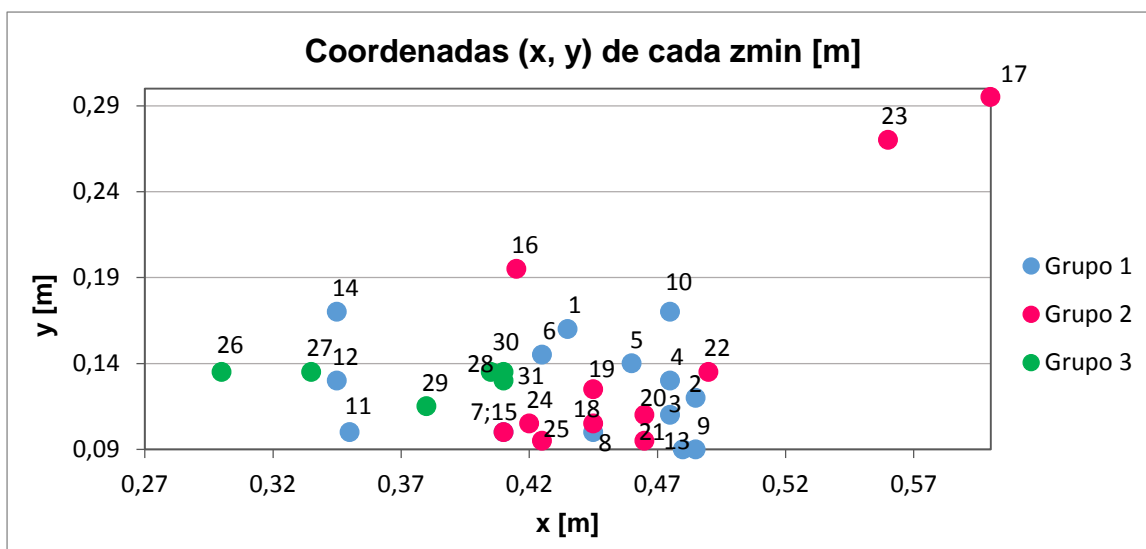


Figura 5.22: Localização em planta dos pontos correspondentes ao zmin de cada ensaio (Fotogrametria)

Dado que o levantamento manual de coordenadas foi executado em pontos fixos, o gráfico da posição, em planta, dos pontos correspondentes a zmin terá de corresponder necessariamente a um dos pontos de medição (Figura 5.23). À semelhança da Figura 5.22, cada ponto de levantamento tem indicação das reconstruções a que se refere.

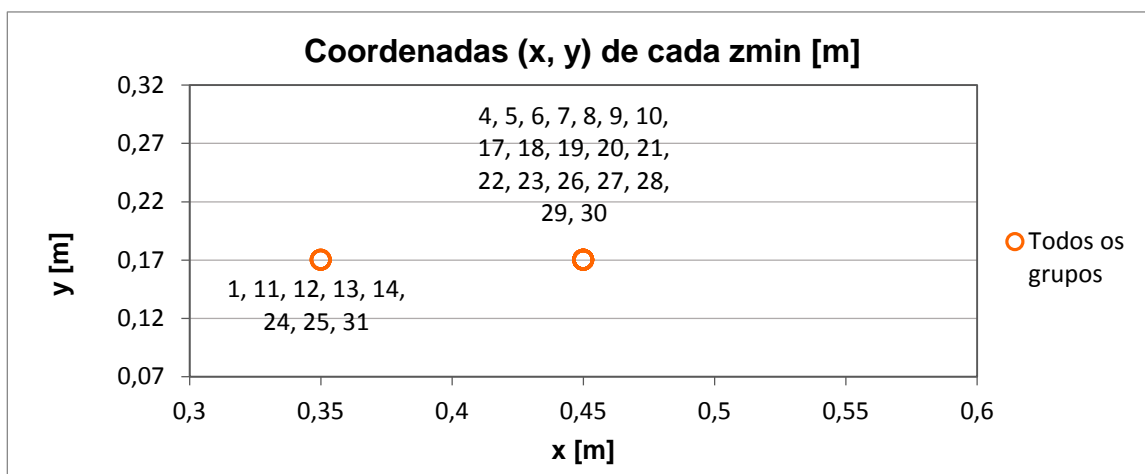


Figura 5.23: Localização em planta dos pontos correspondentes ao zmin de cada ensaio (Manual)

Analisando a posição em x do zmin obtida por fotogrametria, Figura 5.22, verifica-se que existe uma grande concentração de pontos entre 0,41 m e 0,49 m. Verifica-se ainda que a coordenada x do zmin varia com o grupo de ensaio, aumentado quando se passa dos ensaios do grupo1 (entre 0,34 m e 0,48 m), para o grupo 2 (entre 0,41 m e 0,60 m) e estando mais concentrada em valores mais baixos de x para o grupo 3 (entre 0,34 m e 0,41 m). No entanto, no levantamento manual, devido ao reduzido número de pontos de medição, nesse intervalo só existem dados em 0,45 m (Figura 5.23) e é também aí que se concentram a maior parte dos pontos. Relativamente ao eixo das ordenadas, a maior concentração de pontos na fotogrametria observou-se entre 0,09 m e 0,17 m e apenas em dois ensaios do grupo 2 se observaram valores fora deste intervalo. Mais uma vez na medição manual, neste intervalo apenas existem valores em 0,17 m e por isso todos os pontos se concentram aí.

Desta análise conclui-se que a maioria dos pontos de profundidade máxima registados por fotogrametria não estavam localizados nas mesmas posições em planta dos pontos resultantes do levantamento manual, não sendo comparáveis. Deste modo, compararam-se as profundidades máximas, em cada reconstrução, utilizando-se para isso as coordenadas (x, y) do do levantamento manual, aqui denominado por zfundo, com os valores de profundidade registados por fotogrametria, obtidas da interpolação de imagem, com o programa MATLAB “Prog_zmin”.

A Figura 5.24 ilustra graficamente a sobreposição da profundidade dos levantamentos por fotogrametria com a dos levantamentos manuais, localizados nos mesmos pontos de coordenadas (x, y), para os ensaios do Grupo 1. Sobre os pontos de levantamento estão indicadas as respectivas condições de agitação.

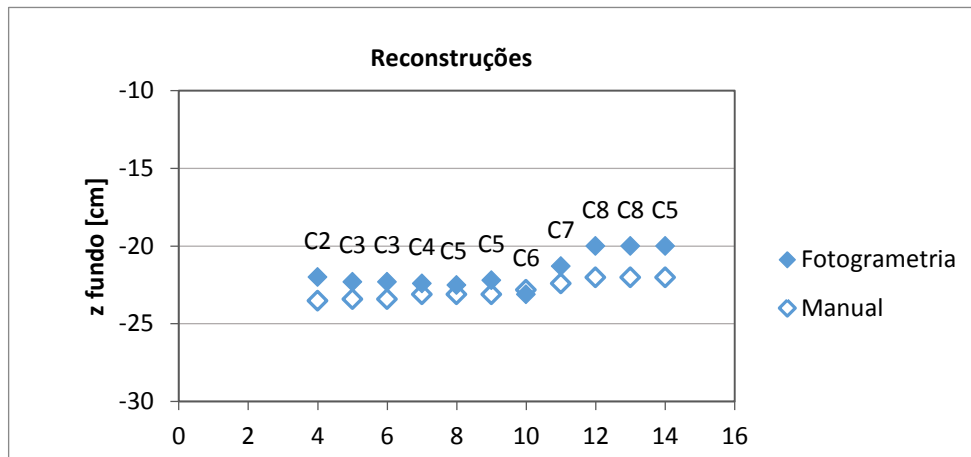


Figura 5.24 : Profundidades do fundo ao longo do grupo 1, nos pontos de coordenadas (x, y) correspondentes à profundidade máxima na medição manual

Da análise da Figura 5.24 pode observar-se que os valores da fotogrametria são quase sempre superiores aos dos levantamentos manuais e que existe alguma disparidade entre valores de z_{fundo} da fotogrametria e de levantamento manual ao longo de alguns dos ensaios do grupo 1, já que se observam diferenças de profundidade variáveis entre 1,1 cm e 1,50 cm nas três primeiras reconstruções (4, 5 e 6) e 2 cm, nas quatro últimas (11, 12 e 13). Estas diferenças podem estar relacionadas quer com erros de medição manual quer com erros de fotogrametria. Nas reconstruções 7 a 10 o z_{fundo} obtido pelos dois métodos é muito semelhante.

Neste estudo, houve alguns factores que podem ter contribuído para falhas de fotogrametria, como o facto: do alvo submerso não ser fixo e das câmaras serem retiradas no fim de cada dia, o que levou a que se fizessem correcções de referencial; de não existir uma referência fixa no tanque (por exemplo um tijolo) que pudesse vir a ser útil para correcções de profundidade; de existirem sombras e reflexos nas imagens, devido à variação de luminosidade ao longo do dia, que afectam os resultados. Acresce a estas dificuldades que o tanque não era completamente estanque, o que influenciava ligeiramente as medições feitas por esta técnica ao longo de um dia, já que o nível de água podia sofrer pequenas alterações que eram tratadas como alteração da cota do fundo. Relativamente aos erros de medição manual, estes podem estar relacionados com o manuseamento do suporte do hidrómetro, ou seja, para a medição de um determinado ponto, era necessário colocar, sobre o ponto de medição, a estrutura metálica onde o hidrómetro se encontrava, sempre na mesma posição, em x e em y, e uma pequena alteração dessa posição, passível de acontecer, podia levar a um erro no valor de z medido. A conjugação destes pequenos erros terá provocado, em alguns casos, as diferenças de profundidade observadas na Figura 5.24.

Analisando em pormenor as reconstruções da Figura 5.24, observa-se que o levantamento manual ilustra a existência de deposição de sedimentos no ensaio que antecede a reconstrução 7, ao passo que o levantamento por fotogrametria mantém aproximadamente a mesma profundidade. De forma oposta, a fotogrametria identifica deposição entre a reconstrução 10 e a 11, enquanto o levantamento manual mantém a mesma profundidade nas duas

reconstruções. De forma a averiguar o que, de facto, aconteceu, observaram-se as imagens das reconstruções 6 e 7 (Figura 5.25) e das reconstruções 10 e 11 (Figura 2.26).

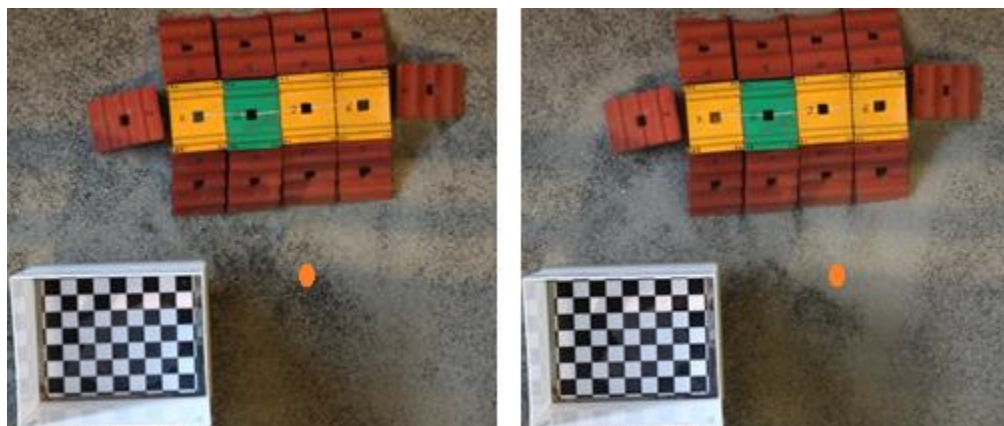


Figura 5.25: Reconstrução 6, após dois ensaios com $Tp=1,34$ s e $Hs=2,5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 7, após dois ensaios com $Tp=1,34$ s e $Hs=5$ cm (Direita)

O ponto de medição na reconstrução 7 localiza-se em $x=0,45$ m e $y=0,17$ m (Figura 4.12), ou seja, a 10 cm do triângulo junto ao bloco C onde se encontra a marcação a laranja na Figura 5.25. Por comparação com as figuras anteriores, é visível a deposição sedimentar na área onde se insere o ponto em questão, já que se nota uma alteração de coloração mais homogénea no lado direito da Figura 5.25. Deste modo, pode concluir-se a existência de um erro de fotogrametria.

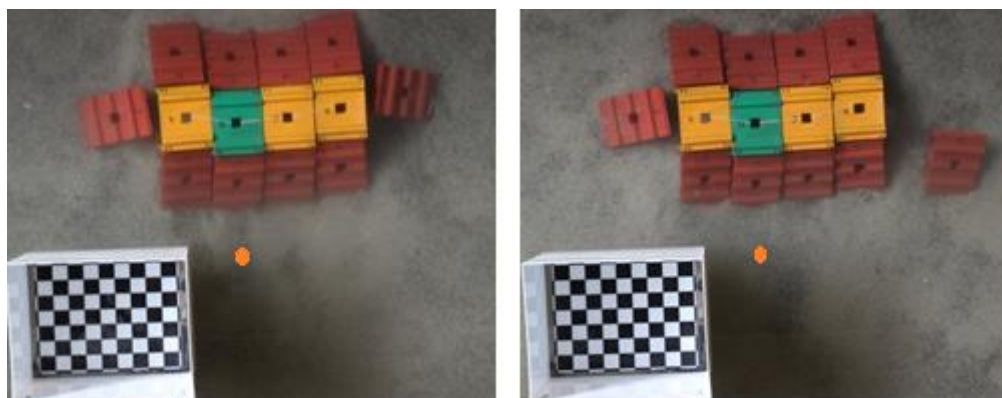


Figura 5.26: Reconstrução 10, após dois ensaios com $Tp=2,68$ s e $Hs=5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 11, após dois ensaios com $Tp=1,79$ s e $Hs=15$ cm (Direita)

Na observação da Figura 5.26, é notória a presença de deposição, principalmente visualizando os “pés dos triângulos”. Sabendo que o ponto em questão na reconstrução 11 se encontra na posição $x=0,35$ m e $y=0,17$ m (em frente ao bloco B), conclui-se que neste caso terá havido um erro na medição manual.

Observa-se ainda que nas reconstruções 4, 5, 6, 12, 13 e 14, apesar das diferenças de profundidade, o andamento dos pontos no levantamento manual e no de fotogrametria é muito semelhante. Nota-se também a existência clara de um fenómeno de erosão no ensaio que antecedeu a décima reconstrução, seguido de um fenómeno de deposição (Figura 5.26) nos dois ensaios que se seguiram, tendo havido uma estabilização do fundo até ao fim do grupo 1.

Para o primeiro grupo de ensaios, conclui-se que a condição de agitação que provocou maior deposição no fundo foi a C7, de $Tp=1,79$ s e $Hs=15$ cm, ou seja, a que correspondia a um clima de tempestade. A Figura 5.27 ilustra graficamente a sobreposição da cota dos levantamentos por fotogrametria com a dos levantamentos manuais, localizados nos mesmos pontos de coordenadas (x, y), para os ensaios do grupo 2. Sobre os pontos de levantamento estão indicadas as respectivas condições de agitação.

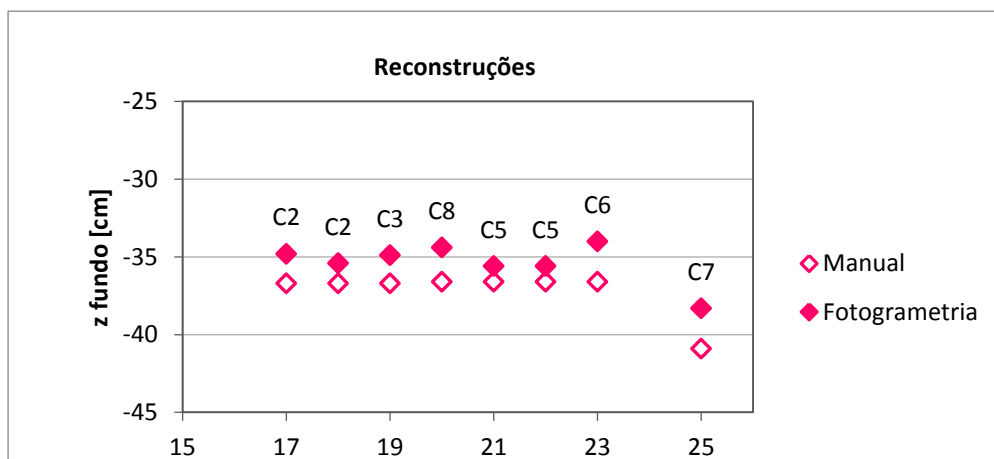


Figura 5.27: Profundidades do fundo ao longo do grupo 2, nos pontos de coordenadas (x, y) correspondentes à profundidade máxima na medição manual

Na Figura 5.27, são notórias as diferenças de profundidade, variando entre 1,0 e 2,6 cm, observando-se que os valores manuais são sempre inferiores aos obtidos pela fotogrametria, tal como aconteceu para os ensaios do grupo 1. Os casos em que o levantamento manual do fundo se mantém constante e o levantamento por fotogrametria apresenta maiores alterações entre reconstruções, correspondem à passagem da reconstrução 20 para a 21, onde se verifica uma erosão de 1,2 cm e da 22 para a 23, onde se observa uma deposição de 1,6 cm. De forma a avaliar a técnica que melhor reproduziu a realidade neste grupo de ensaios, observou-se e comparou-se a reconstrução 20 com a 21 (Figura 5.28), de modo a que se verificasse visualmente a existência, ou não, de erosão entre estes dois momentos, da mesma forma que se observou a reconstrução 22 e 23 (Figura 5.29) para a verificação de deposição.

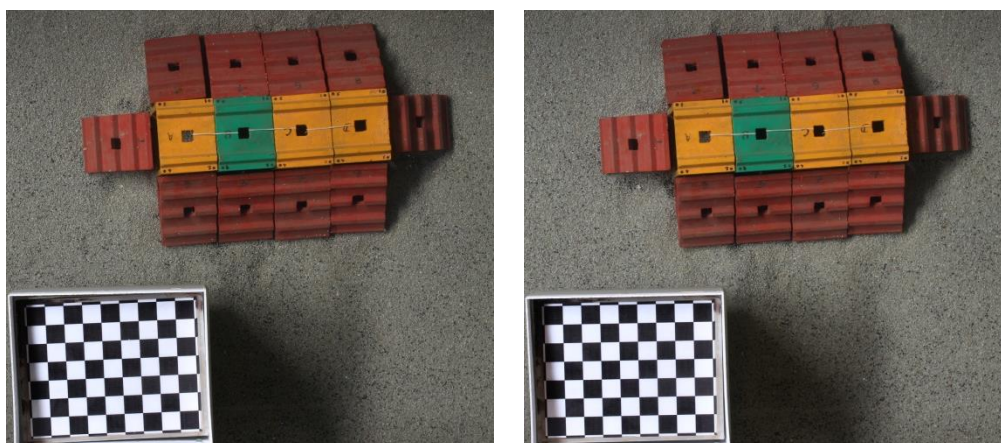


Figura 5.28: Reconstrução 20, após dois ensaios com $Tp=1,34$ s e $Hs=5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 21, após dois ensaios com $Tp=2,68$ s e $Hs=2,5$ cm (Direita)

Observando a Figura 5.28, não são visíveis alterações significativas no fundo, o que leva a concluir que o registado pela técnica da fotogrametria estará incorrecto. Tratando-se de um ensaio com altura de onda significativa de 2,5 cm, seria de esperar que pouco ou nada se alterasse. Assim, a justificação para a existência do erro observado, da parte da fotogrametria, poderá ser as sombras bastante visíveis, que a caixa que contém o alvo provoca sobre o sedimento e que podem induzir erros na reconstrução das imagens.

Já no que se refere às reconstruções 22 e 23, da Figura 5.29, não é possível retirar conclusões, pois as sombras existentes provocam algumas dúvidas. No entanto, uma deposição com altura de 1,6 cm, como demonstram os dados da fotogrametria, deveria ser visível na fotografia, o que não ocorre.

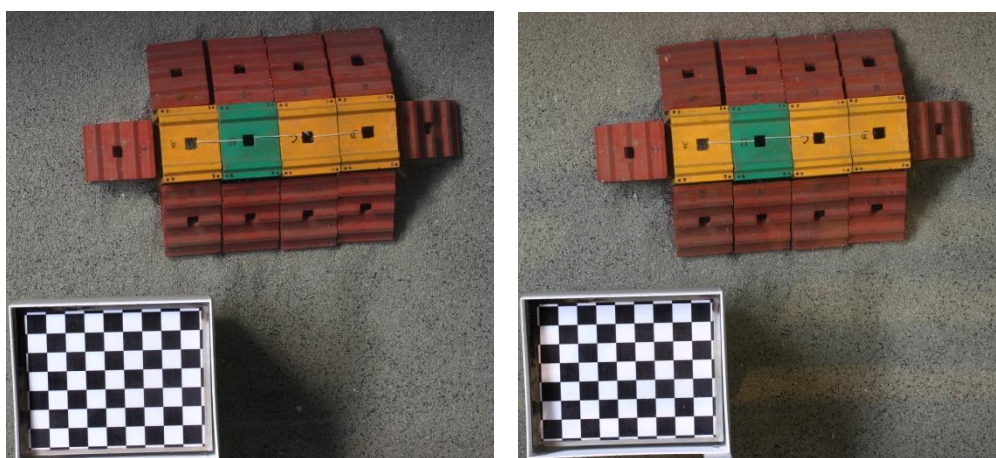


Figura 5.29: Reconstrução 22, após dois ensaios com $T_p=2,68$ s e $H_s=2,5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 23, após dois ensaios com $T_p=2,68$ s e $H_s=5$ cm (Direita)

Neste grupo de ensaios, com preia-mar, foi observável alguma movimentação da parte superior dos blocos aquando da passagem da onda. No entanto, como a distância entre o nível de água e o topo da estrutura era relativamente elevada, cerca de 20 cm, a estrutura não instabilizava. Em relação ao fundo, é bastante claro o facto da condição de agitação correspondente a altura da onda significativa de 15 cm e período de pico de 1,79 cm (C7) ter sido a que provocou uma alteração considerável no fundo. Por observação da Figura 5.28, é notório que tanto no levantamento por fotogrametria, como no levantamento manual, o fenómeno de erosão removeu cerca de 4 cm de sedimento do fundo, no ponto de cota mínima.

A Figura 5.30 ilustra graficamente a sobreposição da profundidade dos levantamentos por fotogrametria com a dos levantamentos manuais, localizados nos mesmos pontos de coordenadas (x, y), para os ensaios do Grupo 3. Sobre os pontos de levantamento estão indicadas as respectivas condições de agitação.

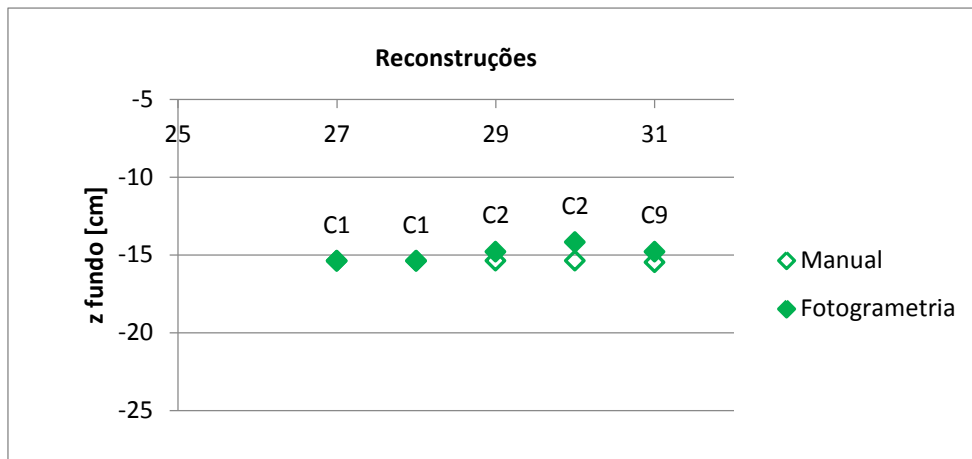


Figura 5.30: Profundidade do fundo ao longo do grupo 3, nos pontos de coordenadas (x, y) correspondentes à profundidade máxima na medição manual

Na Figura 5.30 observa-se que a cota mínima do fundo medida manualmente não sofreu qualquer alteração. No entanto, nos resultados da fotogrametria existem ligeiras deposições entre as reconstruções 28 e 30, de cerca de 1,2 cm e uma erosão no ensaio final de 0,6 cm.

No que se refere à reconstrução 30, devido a ser o primeiro ensaio do dia 11 de Dezembro, a cota do fundo teria necessariamente de ser igual à última reconstrução do dia anterior, a reconstrução 29. Visto que as reconstruções 29 e 31 têm exactamente a mesma profundidade, conclui-se que o nível de água diminuiu durante a noite e quando se recolheu a imagem, ainda não estava reposto. Deste modo, existe uma diferença de 0,4 cm que não deverá ser tida em conta.

Relativamente à ligeira deposição existente entre a reconstrução 28 e a 29, o método para verificar a existência desta alteração do fundo será o mesmo que foi utilizado nos grupos de ensaios anteriores, ou seja, a observação das imagens recolhidas após ensaios. A Figura 5.31 ilustra as reconstruções 28 e 29.

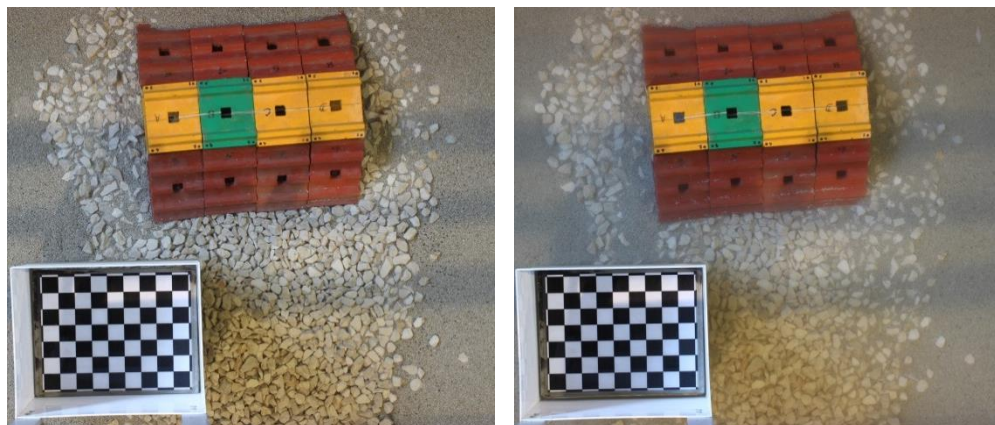


Figura 5.31: Reconstrução 28, após dois ensaios com $Tp=1,34s$ e $Hs=5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 29, após dois ensaios com $Tp=2,23$ s e $Hs=7,5$ cm (Direita)

Observada a figura anterior, é visível a ocorrência de deposição de sedimento sobre o manto de gravilha, entre a imagem da esquerda e a imagem da direita da Figura 5.31. No entanto, a deposição não é superior a 1 cm, como se observa no levantamento por fotogrametria. Assim, tudo indica que tenha existido um pequeno erro de medição manual que pode ter-se dado devido à forma irregular do manto de gravilha, dificultando a medição através de um hidrómetro e/ou um erro de fotogrametria provocado pelas visíveis sombras.

Da análise da Figura 5.30 conclui-se ainda que a condição de agitação que produziu uma ligeira alteração no fundo, neste caso deposição, foi a correspondente ao período de pico de 2,24 segundos e altura significativa de 7,5 cm.

Finalizada a análise comparativa das medições do fundo efectuadas pelas duas técnicas, apresenta-se a verificação da cota dos blocos constituintes da estrutura submersa ao longo dos três grupos de ensaios realizados. A análise relativa aos blocos será realizada de forma análoga à efectuada para o fundo, com a sobreposição gráfica do levantamento da cota dos blocos, pelo método da fotogrametria e pelo método manual. Tal como no ponto 5.2.2, apresentam-se aqui as cotas correspondentes ao Bloco C.

Na Figura 5.32 apresenta-se a variação das cotas do Bloco C ao longo dos ensaios do grupo 1. Sobre os pontos de levantamento estão indicadas as respectivas condições de agitação.

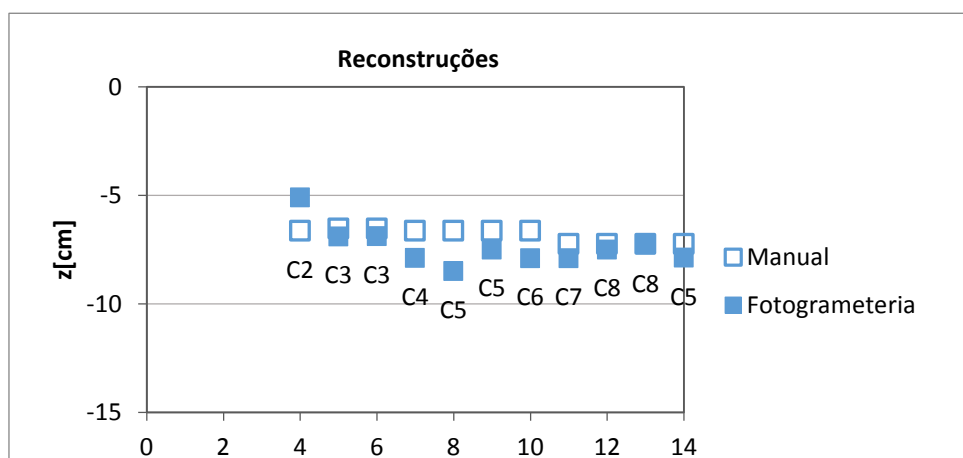


Figura 5.32: Sobreposição das cotas do Bloco C ao longo dos ensaios do grupo 1 (Baixa-mar)

Observando a Figura 5.32, verifica-se que no levantamento manual, o bloco C manteve-se sensivelmente à mesma profundidade até à reconstrução 10, onde sofreu um ligeiro afundamento de cerca de meio centímetro, mantendo-se aproximadamente nessa cota até ao fim dos ensaios deste grupo. No entanto, quando se observa o andamento relativo à fotogrametria, verificam-se maiores alterações de profundidade, não só fenómenos de afundamento mas também de subida da cota.

A primeira diferença que se observa entre os dois métodos de levantamento é na transição da reconstrução 4 para a 5, em que a fotogrametria ilustra ter havido um afundamento de 1,8 cm no bloco C e o levantamento manual mostra uma alteração insignificante. Como o ensaio correspondente à quarta reconstrução tinha como condição de agitação de $T_p=1,34$ s e $H_s=2,5$ cm (C3) e não provocou alteração assinalável do fundo (Figura 5.25), não seria expectável uma movimentação do bloco de 1,8 cm. Assim, o erro será da fotogrametria e pode ser devido a erros associados aos disparos das máquinas ocorrerem quando ainda existia alguma ondulação residual no tanque.

As razões das diferenças observadas nas reconstruções 7, 8 e 9, de aproximadamente 2 cm, não são passíveis de serem explicadas com base na análise das fotografias efectuadas. Podem dever-se, no entanto, aos erros referidos anteriormente quer na fotogrametria quer nos levantamentos manuais.

Na Figura 5.33 apresenta-se a variação das cotas do Bloco C ao longo dos ensaios do grupo 2. Sobre os pontos de levantamento estão indicadas as respectivas condições de agitação.

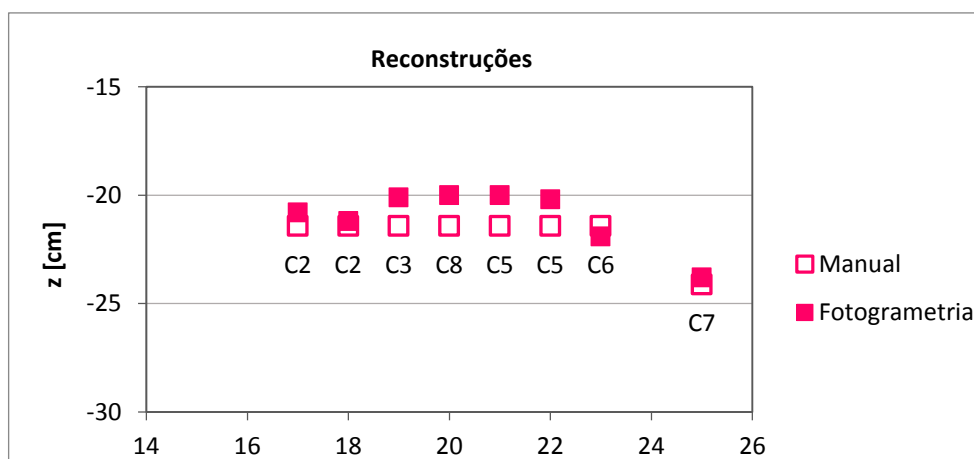


Figura 5.33: Sobreposição das cotas do Bloco C ao longo dos ensaios do grupo 2 (Preia-mar)

Na análise da Figura 5.33 verifica-se que, embora existam algumas diferenças entre os levantamentos dos dois métodos, o andamento é semelhante, sendo clara a existência de afundamento dos blocos entre a reconstrução 23 e 25. Este afundamento deve-se certamente às condições de tempestade que foram reproduzidas durante 48 minutos após a reconstrução 23 (C7).

As maiores diferenças são observadas nas reconstruções 19 a 22, sendo os valores obtidos pela fotogrametria ligeiramente superiores aos do levantamento manual, com uma diferença máxima de 1,4 cm. As causas destas diferenças podem ser várias, como já referido anteriormente, mas através da análise das fotografias não é possível identificar uma razão principal.

Finalizando a análise do grupo 2, conclui-se que os blocos mantiveram um comportamento aproximadamente constante, tendo havido uma alteração acentuada após a condição de agitação correspondente a tempestade, onde os blocos afundaram pouco mais de 2 cm.

Na Figura 5.34 apresenta-se a variação das cotas do Bloco C ao longo dos ensaios do grupo 3. Sobre os pontos de levantamento estão indicadas as respectivas condições de agitação.

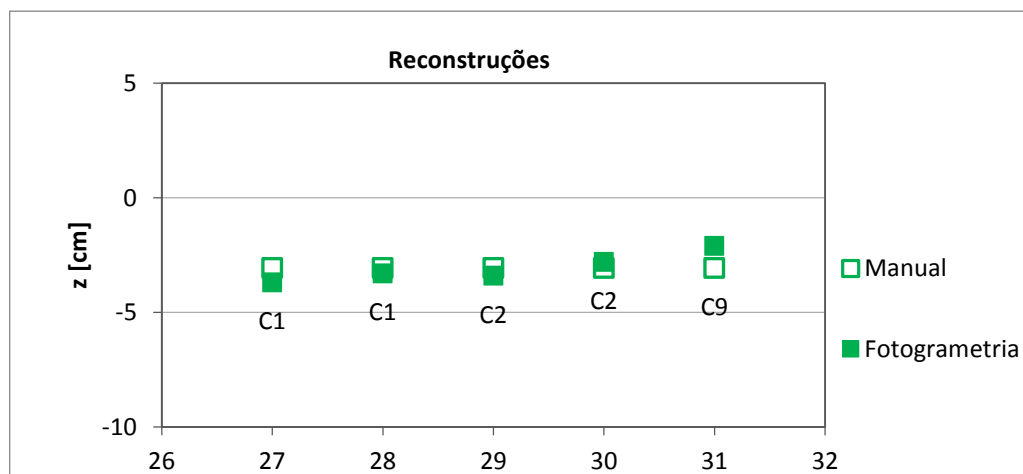


Figura 5.34: Sobreposição das cotas do Bloco C ao longo dos ensaios do grupo 3 (Preia-mar e gravilha)

A análise do grupo 3, referente à cota dos blocos ao longo dos ensaios, indica que as alterações entre ensaios não foram expressivas. Dado tratar-se do caso em que a estrutura se encontrava sobre um manto de gravilha, que era estável frente à acção da agitação, esperava-se que a ocorrência de deslocamentos fosse reduzida.

Existem pequenas diferenças de cota entre os dois métodos de levantamento utilizados, com valores máximos próximos de 1 cm. Os valores da cota obtidos para as reconstruções 27 e 28 e para as reconstruções 29 e 30 diferem ligeiramente quando deveriam ter o mesmo valor, por se tratar de imagens tiradas em dias diferentes mas referentes ao final de um mesmo ensaio. Estes erros podem ser consequência de pequenas sombras na imagem ou de imagens recolhidas antes da reposição do nível, como é o caso da reconstrução 30, em que já se concluiu o sucedido na análise do fundo.

Quanto à reconstrução 31, embora o levantamento manual não considere haver alteração da cota do bloco, a fotogrametria considera uma ligeira diminuição desta cota, de cerca de 7 mm. A Figura 5.35 ilustra as reconstruções 30 e 31.

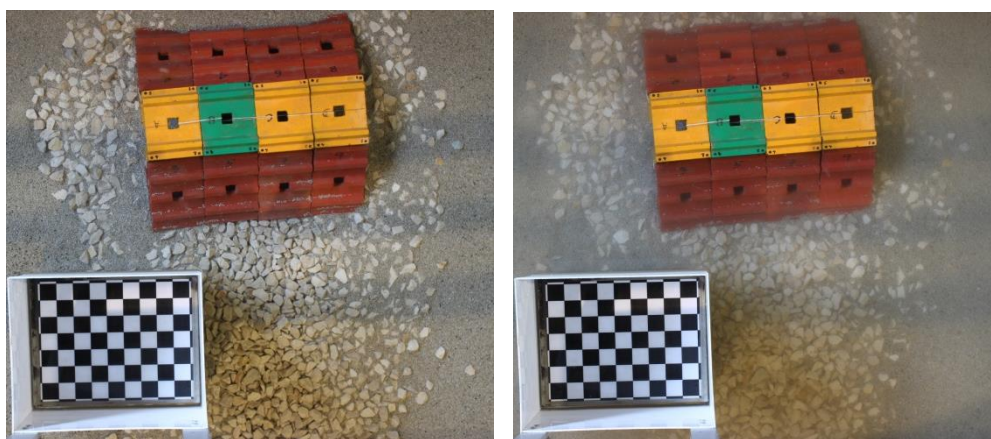


Figura 5.35: Reconstrução 30, após dois ensaios com $T_p=2,24$ s e $H_s=7,5$ cm (Esquerda) e Reconstrução 31, após dois ensaios com $T_p=1,79$ s e $H_s=15$ cm (Direita)

Por observação das figuras, não se consegue verificar movimentação dos blocos. Assim, parece tratar-se de um erro de fotogrametria que amplificou o valor da cota profundidade.

5.4 Interpretação da evolução da erosão e afundamento dos blocos

Concluído o levantamento de cotas, verifica-se que, após a condição de tempestade (C7), o grupo 2 apresenta uma erosão mais acentuada do que o grupo 1, ao contrário do que era espectável. Já nos levantamentos de cotas dos blocos, houve maior afundamento no grupo 1 do que no grupo 2.

Assim, para se verificar qual o fenómeno que ocorreu ao longo dos grupos 1 e 2, analisou-se o Quadro 12 que possui a informação do afundamento dos blocos e da alteração do fundo após cada condição de agitação. Verifica-se que nos ensaios com baixa-mar a maior erosão do fundo ocorreu após o primeiro ensaio, com a condição de agitação C1 ($T_p=1,34$ s e $H_s=5,0$ cm), provocando uma cavidade de erosão com uma profundidade máxima de 4,1 cm. A segunda condição de agitação, C2 ($T_p=2,24$ s e $H_s=7,5$ cm), aumentou a profundidade referida em 3,4 cm, resultando uma profundidade acumulada de 7,5 cm, que foi diminuindo ao longo dos ensaios seguintes, atingindo um valor de 6,0 cm no final dos ensaios. A condição C7 ($T_p=1,79$ s e $H_s=15,0$ cm), embora fosse muito energética, não provocou alterações significativas no fundo. A razão disto deve-se ao facto da condição C7, de onda de tempestade à saída do batedor, devido à sua altura de onda elevada e à baixa profundidade de maré, provocou a rebentação das ondas antes destas atingirem a estrutura, tornando-se aí menos energética e consequentemente, não provocando as alterações no fundo que se previam.

Como referido, para o grupo 1 a maior erosão registada no fundo deu-se após as duas primeiras condições de agitação e, associada a esta erosão, ocorreu o afundamento dos blocos, variável entre si, com um valor máximo de 2,7 cm no Bloco C (Figura 5.36). O valor da profundidade da cavidade de erosão gerada e o valor das cotas dos blocos mantiveram-se inalterados até ao decorrer da condição de agitação C7, correspondente a um clima de tempestade. Apenas no fim deste ensaio se registou um afundamento dos blocos de mais 0,6

cm, atingindo 3,3 cm (Figura 5.37). Como as condições de agitação que se seguiram foram menos energéticas, o fundo e os blocos não sofreram mais alterações.

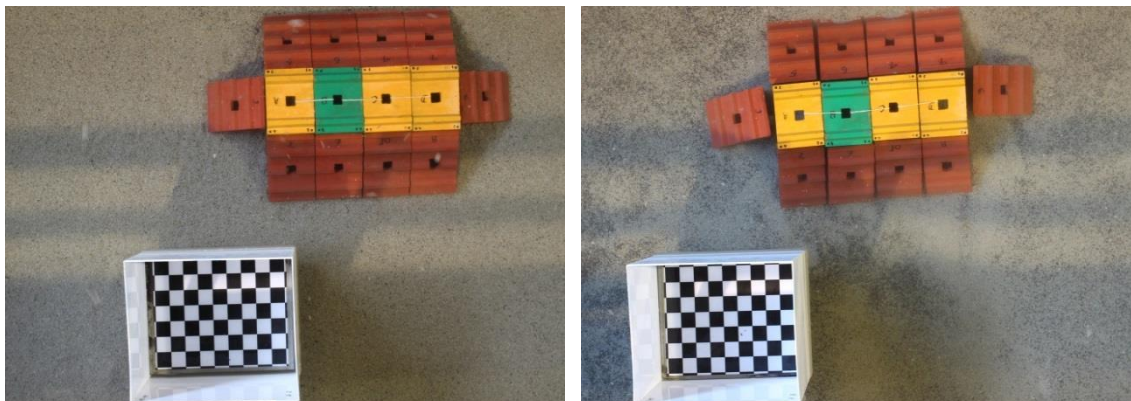


Figura 5.36: Posição inicial (esquerda) e após a condição C2 (direita) do fundo e dos blocos no Grupo 1

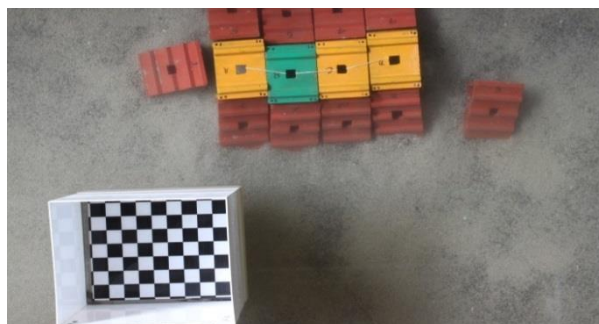


Figura 5.37: Posição do fundo e dos blocos após a condição C7

Relativamente aos ensaios em preia-mar, Grupo 2, também se verificou erosão a sotamar da estrutura após o primeiro ensaio, com um valor máximo de 2,7 cm e um reduzido afundamento dos blocos, 0,2 cm (Figura 5.38). Estes valores mantiveram-se inalterados até à condição de agitação C7 que provocou uma alteração significativa do fundo ao aumentar a profundidade da cavidade em 4,2 cm, totalizando 6,8 cm de profundidade acumulada e um afundamento dos blocos variável entre 0,9 cm e 2,5 cm, valor máximo correspondente ao Bloco C (Figura 5.39). A condição C8b não provocou alterações significativas nem no fundo nem na cota dos blocos.

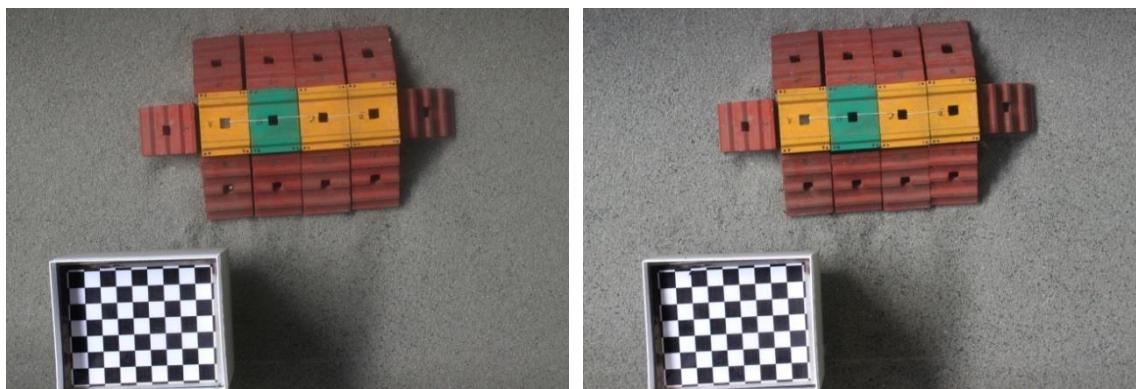


Figura 5.38: Representação inicial (esquerda) e após a condição C2 (direita) do fundo e dos blocos no Grupo 2



Figura 5.39: Representação do fundo e dos blocos após a condição C7 no Grupo 2

Neste segundo grupo de ensaios, a profundidade de maré foi superior à dos ensaios em baixa-mar, portanto, já não se verificou a rebentação antecipada das ondas, mantendo-se estas com aproximadamente a mesma altura e período até atingirem a estrutura. Esta é a razão pela qual o fundo do grupo 2 terminou com uma cavidade mais profunda do que a do fundo do grupo 1. Além disso, após a condição de agitação C2, os blocos do grupo 1 registaram um afundamento máximo de 2,7 cm que passou a 3,3 cm após a condição C7, ao passo que os blocos do grupo 2, com as mesmas condições de agitação registaram 0,2 cm e 2,5 cm, respectivamente. Portanto, da condição C2 para a C7, o grupo 1 teve um aumento de profundidade de 0,6 cm e o grupo 2, de 2,1 cm (Quadro 12, bloco C).

5.5 Comparação dos resultados obtidos no modelo e no protótipo

As medições que foram efectuadas em Santa Maria del Mar contêm informações relevantes sobre o afundamento dos blocos, inicialmente ligados entre si, nomeadamente no que se refere ao valor de afundamento máximo das estruturas assentes sobre fundo arenoso e à estrutura assente sobre gravilha de pequeno diâmetro. É também referido o facto dos levantamentos de cota do fundo terem sido efectuados após a ocorrência de diferentes condições de agitação, onde se incluía uma condição correspondente a tempestade. O afundamento máximo registado ocorreu na estrutura 2 (Figura 3.2), estrutura que assentava sobre fundo arenoso, tendo-se obtido o valor de 1,3 m, ou seja, 52% da altura dos blocos. Quanto à estrutura 3, estrutura que assentava sobre gravilha, esta sofreu um afundamento máximo de 0,8 m, correspondente a 32% da altura dos blocos.

No caso dos ensaios em modelo físico, foram feitos levantamentos após cada condição de agitação, pelo que se pôde verificar que condições de agitação levaram a maiores alterações da posição dos blocos. Considerando os valores obtidos dos levantamentos manuais (Quadro 12), verifica-se que o afundamento máximo dos blocos ocorreu em baixa-mar, com a condição de agitação C7, correspondente a um clima de tempestade ($H_s=3$ m e $T_p=8$ s) e que o valor de afundamento máximo registado foi de 3,3 cm, ou seja, 26,4% da altura dos blocos do modelo. No protótipo, o afundamento máximo foi de 52% da altura dos blocos, valor superior ao medido no modelo e esta diferença pode dever-se às ligações colocadas entre os blocos. No modelo

colocaram-se elásticos a ligar os blocos centrais, já que estas ligações garantiam que os blocos se movimentassem com alguma independência entre si, quer em altura quer em planta, na direcção da propagação da onda, mas não se separassem entre si mais de 0,5 cm. No protótipo sabe-se que algumas ligações foram quebradas, embora não se saiba quando ocorreram.

A estrutura do modelo que assentava sobre gravilha, de diâmetro bastante superior ao do protótipo, não sofreu afundamento. Assim, os resultados obtidos em modelo físico apresentam uma redução de afundamento dos blocos em cerca de 25%, relativamente aos levantamentos do protótipo. Esta diferença pode dever-se ao facto da gravilha colocada ter maior diâmetro no modelo do que no protótipo, tornando-se mais estável.

5.6 Discussão de Resultados

Com a discussão de resultados pretende-se aprofundar a análise de resultados e obter as principais conclusões deste estudo. Para tal, quantifica-se o erro entre os dois métodos de levantamento de cotas, relaciona-se as condições de agitação e nível de maré com os fenómenos de erosão do fundo e de assentamento dos blocos e por fim, apresenta-se a discussão da estabilidade da estrutura com base nos registos do modelo e do protótipo.

Os levantamentos de cotas do fundo e dos blocos foram executados por dois métodos, levantamento por fotogrametria e levantamento manual, pelo que se determinaram os erros existentes entre os dois métodos. A fotogrametria já foi aplicada em diversos ensaios em modelo físico para estruturas com fundo fixo, com erros próximos de 0,3 cm. A determinação dos erros serviu para determinar a precisão dos resultados da fotogrametria quando aplicada a medições de cota de estruturas e de fundo móvel. Com o objectivo de se quantificar o erro associado à fotogrametria, procedeu-se ao cálculo do erro quadrático médio entre as medições obtidas com este método e com o método manual. Este tipo de erro é indicado para casos em que se pretende evidenciar as grandes diferenças entre o valor real e o valor estimado e reduzir a influência das diferenças pouco significativas, tal como se pretende neste estudo.

No Quadro 13 apresenta-se o valor do erro quadrático médio, *EQM*, relativo às cotas mínimas do fundo para as coordenadas x e y do levantamento manual e das médias dos valores das cotas dos blocos, para cada grupo de ensaios, calculado como:

$$EQM = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_i)^2}{n}} \quad (21)$$

onde:

y_i	-	Valor de cota real (levantamento manual)	[cm]
\bar{y}_i	-	Valor de cota estimado (levantamento por fotogrametria)	[cm]
n	-	Número de reconstruções de cada grupo de ensaios	-

Quadro 13: Erro quadrático médio das cotas do fundo e das cotas dos blocos entre os dois métodos de levantamento de cotas

<i>EQM [cm]</i>			
Grupo de ensaios	1	2	3
Fundo	1,413	1,892	0,662
Bloco A	0,854	0,653	0,352
Bloco B	0,986	0,699	0,709
Bloco C	0,970	0,989	0,561
Bloco D	1,229	0,993	0,782

Através do Quadro 13 verifica-se que os grupos com maior erro de medição do fundo correspondem aos ensaios realizados com a estrutura assente em fundo sedimentar.

Os referidos erros dos primeiros dois grupos são no máximo 1,4 e 1,9, respectivamente. Relativamente ao método manual, a precisão deveria ser de 1 mm dada a graduação do hidrómetro. No entanto, a estrutura rolante onde este foi colocado tinha uma precisão inferior à mencionada, já que houve alguma dificuldade em movimentá-lo paralelamente à largura do tanque, admitindo-se uma precisão global de cerca de 4 mm.

Por outro lado, para que se obtivessem bons resultados pelo método da fotogrametria, era necessário que os equipamentos se mantivessem sempre nas mesmas posições e que não houvesse interferência da luz nas imagens. Neste caso, este rigor não pôde ser mantido devido às limitações do alvo flutuante, ao facto das máquinas serem retiradas no fim de cada dia e à variação de luminosidade ao longo do dia. Deste modo, as cotas do fundo não foram levantadas exactamente nas mesmas coordenadas x e y pelos dois métodos utilizados e, ao tratar-se de um fundo sedimentar sujeito a alterações, os levantamentos podem registar valores com algumas diferenças. Além disso, o padrão monocromático do fundo e a granulometria homogénea do sedimento causam uma perda de definição na imagem da reconstrução, provocando erros nos valores da batimetria.

O grupo 3, correspondente aos ensaios em que se colocou um manto de gravilha sob a estrutura e ao redor da mesma, tem um erro de medição do fundo inferior aos anteriores em cerca de 53% relativamente ao primeiro grupo e 65% relativamente ao segundo. Esta diferença de valor pode dever-se ao facto do fundo do grupo 3 ter sido composto por uma camada de cerca de 6 cm de gravilha e não ter estado sujeito a fenómenos de erosão como no caso dos ensaios com fundo sedimentar. Deste modo, mesmo que as cotas não fossem levantadas exactamente com as mesmas coordenadas em planta, o seu valor não diferia muito. Além disso, tratando-se de um fundo de gravilha, a sua granulometria é mais visível e, aliado à cor branca, provoca uma boa definição na imagem da reconstrução. Assim, os erros de medição do grupo 3 são necessariamente inferiores aos dos dois restantes grupos.

Por observação do Quadro 13, verifica-se que o erro nos blocos é inferior ao do fundo nos casos de fundo sedimentar e apresenta valores de erro semelhantes nos blocos e no fundo quando se trata do fundo de gravilha.

Pelo método manual, as cotas dos blocos foram levantadas no centro sotamar e centro barlamar de cada bloco. Pela fotogrametria as cotas foram levantadas em dois pontos a sotamar e dois pontos a barlamar de cada bloco, onde estavam assinalados os pontos de referência, ou seja, a média de cada dois destes pontos do mesmo lado tinha valores muito próximos dos valores centrais medidos manualmente. Deste modo, o erro de medição da coordenada z pela fotogrametria não se relaciona com o alvo flutuante, mas provavelmente com a variação do nível de água no modelo ao longo dos ensaios. Como foi referido, a fotogrametria apresenta levantamentos mais precisos quando se introduzem diferenças cromáticas nos elementos a fotografar. Existindo um acentuado contraste entre as cores dos blocos e a cor do fundo, justifica-se então o facto dos erros de levantamento dos blocos terem sido inferiores aos do fundo.

Assim, supõe-se que os erros da fotogrametria rondem os 6 a 9 mm para os blocos e para o fundo de gravilha e valores próximos de 1,5 cm para o fundo sedimentar, enquanto o erro de medição manual ronda os 4 mm, independentemente do elemento.

No que se refere ao afundamento dos blocos e fenómenos de erosão no fundo, observaram-se os registos dos levantamentos de cotas referentes a cada condição de agitação e os registos da agitação medida nas sondas, de forma a concluir qual o factor ou factores que mais condicionaram a alteração do fundo e movimentação da estrutura. Relativamente à estrutura colocada sobre gravilha, o objectivo foi perceber se a estabilidade da estrutura dependia da estabilidade do fundo ou, se sendo independentes, o factor condicionante seria a condição de agitação. Os pontos abordados no início deste sub-capítulo são descritos e discutidos seguidamente.

Os resultados obtidos nos ensaios em modelo físico reduzido permitiram verificar que o afundamento dos blocos se devia essencialmente a problemas de apoio da sua fundação devido à erosão formada a sotamar da estrutura, que variava segundo as condições de agitação e o nível de maré.

A Figura 5.40 apresenta o Número de Shields das condições de agitação próximas da obra, medidas no modelo, ou seja, o parâmetro calculado com base nas alturas significativas de onda e períodos de pico obtidos pela sonda 3 que se encontrava próxima da estrutura. O valor de Shields crítico (θ_{cr}) representa o início do movimento de sedimentos, portanto, para valores de Shields (θ) superiores a Shields crítico, deveria existir movimento dos sedimentos.

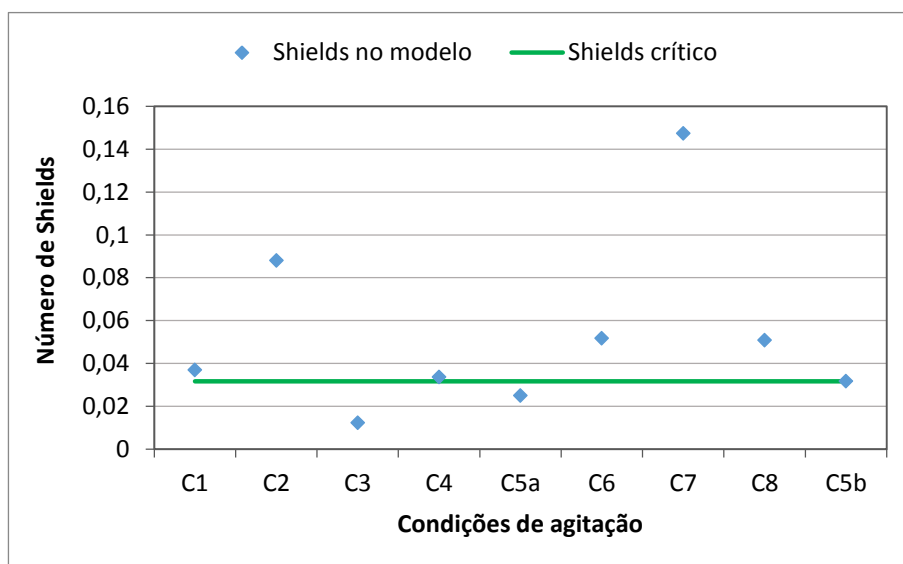


Figura 5.40: Número de Shields no modelo ensaiado em baixa-mar

Na Figura 5.40 observa-se precisamente um aumento do Número de Shields na condição C2 ($Tp=2,24$ s e $Hs=7,5$ cm), indo ao encontro dos registos de levantamentos de cota no fundo. Ou seja, a presença da estrutura levou a uma alteração do perfil do fundo no seu redor, inicialmente de declive constante, com uma forte erosão do fundo a sotamar da estrutura nos primeiros ensaios, reduzindo nos ensaios seguintes por se tratar de condições de agitação menos energéticas, à excepção da condição C7.

O gráfico da Figura 5.40 apresenta ainda um aumento do Número de Shields e consequentemente, movimento sedimentar esperado na condição de agitação C7 ($Tp=1,79$ s e $Hs=15,0$ cm), condição que, embora fosse muito energética, não provocou alterações no fundo. A razão do fundo não se ter alterado na condição de agitação C7 deve-se à rebentação das ondas que ocorreu após as sondas e antes da estrutura. Assim, as ondas que atingiram a estrutura não levaram a que o fundo sofresse uma erosão acentuada, mas os efeitos sobre os blocos ainda tiveram alguma relevância aumentando o seu afundamento (Quadro 12).

A Figura 5.41, à semelhança da Figura 5.40, apresenta os valores do Número de Shields para cada condição de agitação para os ensaios de preia-mar.

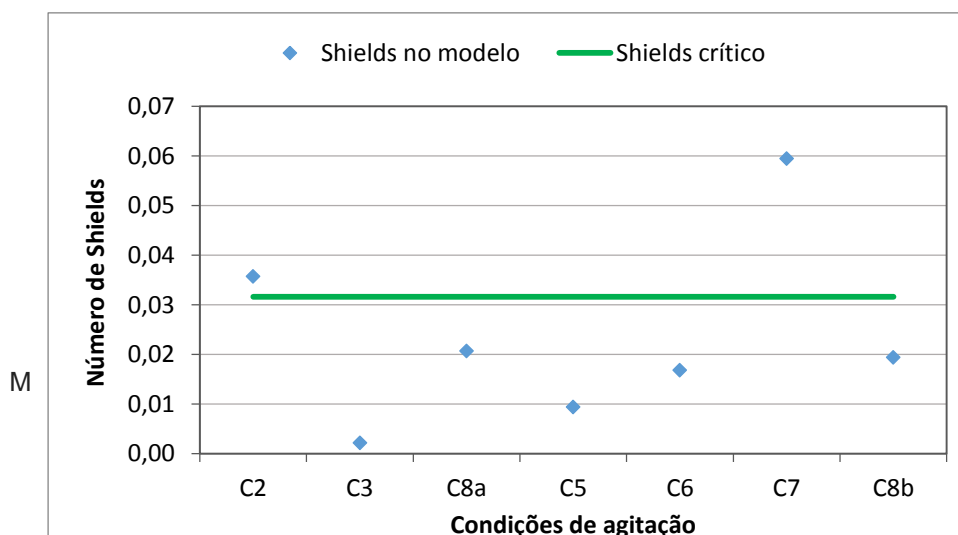


Figura 5.41: Número de Shields no modelo ensaiado em preia-mar

Por observação da Figura 5.41, verifica-se que a movimentação de sedimentos apenas seria esperada para as condições C2 ($Tp=1,79$ s e $Hs=15,0$ cm) e C7 ($Tp=1,79$ s e $Hs=15,0$ cm), que foram precisamente as condições mais energéticas que se ensaiaram neste grupo. Este resultado é compatível com os levantamentos efectuados, em que se registou uma profundidade da cavidade de erosão a sotamar da estrutura de 2,7 cm após a condição C2, valor que se manteve até ao ensaio da condição C7. Para a C7, verificou-se um aumento da cavidade em 4,2 cm, perfazendo uma profundidade acumulada de 6,8 cm (Quadro 12).

A Figura 5.42, apresenta os valores do Número de Shields para cada condição de agitação ensaiada no grupo 3, baixa-mar com a estrutura assente em gravilha.

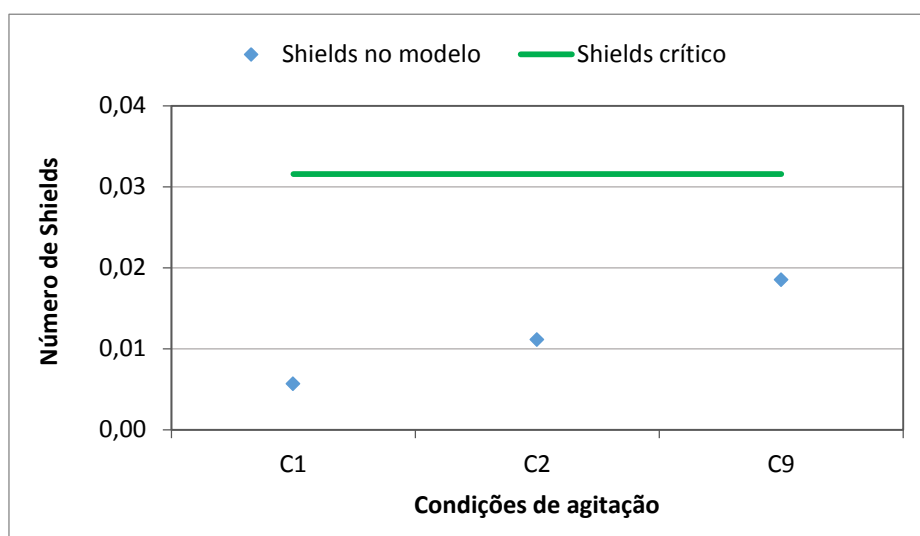


Figura 5.42 : Número de Shields no modelo ensaiado em baixa-mar com gravilha

Como se observa na Figura 5.42, para os ensaios do grupo 3, não seria de esperar alterações significativas do fundo, o que se veio a verificar. Neste caso também não houve alterações significativas dos blocos, o que reforça a conclusão de que o afundamento dos blocos pode estar relacionado com a erosão do fundo a sotamar da estrutura.

De forma resumida, as conclusões mais importantes obtidas neste estudo sobre a influência das condições de agitação e do nível de maré no comportamento do fundo e no afundamento dos blocos são:

- A condição de agitação C7 (tempestade) foi a que levou a um maior afundamento da estrutura. No entanto, devido à perda de energia provocada pela rebentação nos ensaios em baixa-mar, esta não foi a condição que mais condicionou o fundo. Já nos ensaios em preia-mar foi esta a condição que, não só provocou o maior afundamento dos blocos, como a que mais influenciou a alteração do fundo;
- Quanto ao nível de maré, verificou-se que em baixa-mar os blocos tiveram um afundamento superior ao registado em preia-mar, já que o nível de água se encontra mais próximo da estrutura e o escoamento é mais afectado por esta, levando a que a estrutura fosse mais facilmente deslocada para sotamar. A profundidade máxima da cavidade de

erosão a sotamar da estrutura foi semelhante para os dois níveis de maré testados, mas ocorreu para condições de agitação diferentes;

- A cavidade de erosão gerada a sotamar da estrutura parece estar relacionada com o afundamento dos blocos, sendo esta a possível causa dos blocos se deslocarem na direcção de sotamar, afundando-se de seguida na cavidade de erosão. Ou seja, a estabilidade da estrutura depende da estabilidade do fundo.

Os principais resultados obtidos a partir da comparação entre o modelo e o protótipo, nomeadamente, no que se refere ao afundamento e ligações colocadas nos blocos foram:

- Para as estruturas 1 e 2, verifica-se que o afundamento dos blocos registado no modelo é inferior ao registado no protótipo em cerca de 25%;

- No modelo, o afundamento máximo ocorreu após a condição de agitação relativa a tempestade. No protótipo não se tem indicação de quando ocorreu;

- A estrutura 3 do modelo, que assentava sobre gravilha de diâmetro bastante superior ao do protótipo, não sofreu afundamento. A mesma estrutura no protótipo atingiu uma profundidade muito semelhante à das estruturas 1 e 2, apenas demorou mais tempo a alcançá-la;

- Nos blocos centrais do modelo físico colocaram-se elásticos que serviam de ligação entre si, de modo a que se garantisse que os blocos se movimentassem com alguma independência em altura e na direcção sotamar, mas não se separassem entre si mais de 0,5 cm. As ligações foram os elementos que não foram escalados neste modelo, tendo sido a solução possível para ligação de uma estrutura modular de pequenas dimensões e em que se pretendia que existisse alguma independência entre os blocos.

Assim, visto que o afundamento dos blocos no modelo foi inferior ao registado no protótipo e que as ligações colocadas no modelo não foram escaladas, conclui-se que os elásticos colocados são uma possível causa para as diferenças obtidas.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação estudou-se, em modelo físico reduzido, a interacção da agitação marítima com uma estrutura marítima modular submersa, assente em solo arenoso e assente em enrocamento. A estrutura em estudo era composta por três módulos destacados e submersos, constituídos por blocos, situadas na Praia de Santa Maria del Mar em Cadiz, Espanha, cujo objectivo era assegurar a protecção costeira contra a erosão. No entanto, a sua função não foi cumprida já que os blocos começaram a assentar e afundar-se no solo logo após a sua colocação.

Com o objectivo de avaliar da estabilidade dos blocos submersos e a alteração do perfil do fundo em torno da estrutura submersa, realizaram-se ensaios em modelo físico reduzido, à escala 1:20, num tanque de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

A modelação física do caso de estudo teve como objectivo a análise da influência do nível de maré, das condições de agitação e do material onde a estrutura assentava, na alteração do fundo e na estabilidade da estrutura. Deste modo, avaliaram-se os factores responsáveis pela instabilização da estrutura e pelas variações do fundo, para melhor compreender os fenómenos envolvidos.

Através do modelo físico reduzido, obtiveram-se resultados relativos à alteração das cotas da estrutura e do fundo a sotamar desta, considerando, para tal, os valores das cotas iniciais e os valores das cotas após cada ensaio, correspondente a uma determinada condição de agitação e nível de maré.

Os levantamentos efectuados foram realizados por dois métodos diferentes, com recurso a um hidrómetro e através de fotogrametria, permitindo assim testar a aplicabilidade da fotogrametria em futuros estudos de hidráulica marítima considerando fundo móvel. Assim, para cada condição de agitação e nível de maré, obtiveram-se valores de afundamento médio dos blocos, valores de cota máxima atingida pelo fundo e a respectiva profundidade acumulada. A partir destes resultados puderam retirar-se algumas conclusões relacionadas com a relação entre a altura significativa de onda, o período de pico e o nível de maré e os resultados em termos de alteração do fundo e da posição da estrutura.

Concluiu-se que, para este estudo, a variação do período da onda não teve influência significativa nas alterações em causa, já que para os mesmos períodos existiram diferentes resultados, sem nenhuma tendência marcada.

Verificou-se também que, para qualquer um dos níveis de maré ensaiados, a variação da altura significativa de onda, H_s , foi o factor que levou a uma maior alteração no fundo e maior mobilização da estrutura submersa. O valor mínimo de H_s para o qual se observou a ocorrência de alterações morfológicas e da posição da estrutura foi de 1,5 m (à escala do protótipo). De forma análoga, qualquer que seja a condição de agitação, o nível de maré de baixa-mar é mais condicionante do que o de preia-mar para a estabilidade da estrutura.

Com referência à camada de gravilha colocada sob a estrutura submersa e sobre a zona sujeita a maiores alterações de fundo, mesmo em condições de agitação correspondentes a tempestade, a sua presença levou a que não ocorressem fenómenos relevantes de erosão no fundo e, consequentemente, assentamentos da estrutura. Assim, concluiu-se que a instabilização da estrutura foi provocada essencialmente pela instabilização do fundo, ou seja, por um problema de fundação e não por questões relacionadas com as condições de agitação energéticas.

Compararam-se ainda os resultados do modelo com o observado em protótipo. Em protótipo verificou-se um afundamento máximo dos blocos de 1,3 m, ou seja, 52% da altura dos blocos. No entanto, no modelo o maior registo de afundamento deu-se em baixa-mar com condição de agitação correspondente a tempestade, tendo sido o seu valor de 3,3 cm, ou seja, de 26,4% da altura dos blocos. Esta diferença do afundamento pode ser devida à diferença da interligação entre blocos, no modelo e no protótipo. Efectivamente, no modelo colocaram-se ligações entre os blocos, tal como ocorreu no protótipo na fase de colocação. No entanto, no protótipo, algumas destas conexões foram quebradas e foi verificado que após um certo período temporal alguns blocos se encontravam separados dos restantes. Assim, no modelo, as ligações entre blocos terão sido mais sólidas do que as no protótipo, fazendo com que os blocos funcionassem como uma só estrutura, conduzindo assim a uma redução do seu afundamento. Outras razões para as diferenças do afundamento encontrado no modelo e no protótipo podem ser a incorrecta representação no modelo dos fenómenos de interacção escoamento-sedimento, devido a limitações de escala (por exemplo, possíveis fenómenos de liquefacção de areias não foram analisados).

Para concluir, sugerem-se algumas recomendações que poderão ser úteis em trabalhos futuros, com base na modelação e análise que foram executadas ao longo deste estudo.

Relativamente aos métodos de levantamento de cotas utilizados no modelo, sugere-se que em futuros estudos, a fotogrametria seja utilizada com maior precisão, alterando e adicionando alguns factores, de modo a que o erro de medição se reduza. A utilização de melhor iluminação artificial para evitar sombras, a verificação rigorosa do nível de água para evitar a ocorrência de erros nas cotas, a limpeza da água para evitar resultados incorrectos e a utilização de uma caixa com a medida exacta do alvo submerso para evitar deslocamentos horizontais do mesmo, são tarefas que podem tornar os resultados mais precisos. Dado que a fotogrametria apresenta uma boa definição na reconstrução de imagens quando se introduzem diferenças cromáticas sugere-se, quando possível, a utilização de sedimento colorido para que se obtenham levantamentos mais precisos.

Como se referiu anteriormente, a altura significativa de onda foi um dos factores condicionantes para a ocorrência de fenómenos de erosão e de afundamento do quebra-mar destacado submerso.

Verificou-se ainda que a instabilização dos blocos foi essencialmente provocada pela erosão do fundo a sotamar da estrutura, isto é, por um problema de fundação. Assim, para a

estabilização dos quebra-mares destacados submersos e sua consequente eficácia na protecção costeira contra a erosão, sugere-se que seja dada maior atenção à sua fundação. Para além disto, sugere-se a interligação de forma robusta entre os blocos, dificultando a sua separação. Para optimizar os custos em protótipo, sugere-se a modelação física de um modelo com as mesmas condições ensaiadas, mas com gravilha de diâmetro mediano 5 mm, verificando-se se a estabilidade da estrutura se mantém e se é possível reduzir o diâmetro em protótipo.

BIBLIOGRAFIA

- Capitão, R. (2002) – *Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Dean, R. G., Dalrymple, R. A. (1991) - Advanced Series on Ocean Engineering: *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Vol.2. World Scientific, Singapore.
- Ferreira, R., Costeira, J. P., Silvestre, C., Sousa, I., Santos, J. A. (2006) – *Using stereo image reconstruction to survey scale models of rubble-mound structures*. 1st CoastLab 2006, International Conference on the application of physical modeling to port and coastal protection, Porto, Portugal, 107-116.
- Fredsoe, J., Deigaard, R. (1992) - Advanced Series on Ocean Engineering: *Mechanics of Coastal Sediment Transport*, Vol. 3, Capítulo 7. World Scientific, Singapore.
- Grasso, F., Michallet, H., Barthélemy, E., Certain, R. (2009) – *Physical modeling of intermediate cross-shore bed morphology: Transients and equilibrium states*. Journal of Geophysical Research, Vol. 114.
- Hydralab III (2007) – *Guidelines for physical model testing of breakwaters: Rubble mound breakwaters*.
- Hughes, S. A. (1993) - Advanced Series on Ocean Engineering: *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*, Vol. 7. World Scientific, Singapore.
- Kamphuis, J. William (2000) - Advanced Series on Ocean Engineering: *Introduction to Coastal Engineering and Management*, Vol. 16. World Scientific, Singapore.
- King, D., Galvin, C.J. (2002) - Coastal Sediment Properties. In Walton, T. (Ed.), *Coastal engineering manual*, Part III, *coastal sediment processes*, Chapter III-1, engineer manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Kortenhaus, A., Van Der Meer, J. W., Buurcharth, H. F., Geeraerts, J., Pullen, T., Ingrand, D., Troch, P. (2005) – *D40 report on conclusions of scale effects*. CLASH WP7- Report.
- Lemos, R., Santos, J. (2010) – *Measuring armour layer erosion in scale model tests*. Proceedings on the Third International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Lisboa.
- Lemos, R., Contente, J., Santos, J.A. (2012) - *Ensaio em Modelo Reduzido de Quebra-mares de Taludes. Aplicação da Fotogrametria no Levantamento de Perfis* - MEFTE 2012. IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia - Lisboa
- Lemos, R., Fortes, C. J. E. M., Capitão, R., Santos, J. A., Silva, L. G. (2014) – *Contribuição para uma automatização da visualização, análise e partilha de ensaios em modelo físico reduzido de estruturas marítimas*. 12.º Congresso da Água / 16.º ENASB / XVI SILUBESA, Lisboa.

- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., McGlone, J. C. (2001) – *Introduction to modern photogrammetry*, Vol. 1. John Wiley & Sons Inc, New York.
- Medina, J. R., Muñoz-Perez, J. J., Gomez-Pina, G. (2006). *Transmission and Reflection of Modular Detached Breakwaters*. Coastal Engineering Conference (ASCE).
- Muñoz-Perez, J. J., Khan-Mozahedy, A. B. M., Neves, M. G., Tejedor, B., Gomez-Pina, G., Campo, J. M., Negro, V. (2015) – *Sinking of concrete modules into a sandy seabed: a case study*. Coastal Engineering, 99, Vol.1 (I), 44-54.
- Neves, A. C., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F (2008) – *Análise Bidimensional do campo de pressões e da turbulência em quebra-mares submersos*. 3as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Porto.
- Nielson, P. (1992) – Advanced Series on Ocean Engineering: *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*, Vol.4, Cap.2. World Scientific, Singapore.
- Quintela, A. C. (1981) – *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, 11ª Edição, Lisboa.
- Sancho, F. (2012) – *Erosão e Inundação Costeiras: Fenómenos e vulnerabilidades*. Jornadas do Dia do Departamento de Engenharia Civil sob o tema “Hidráulica – um olhar contemporâneo”, Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de Viseu, 9 de maio de 2012.
- Soulsby, R. (1997) – *Dynamics of Marine Sands*. Thomas Telford Publications, London.
- Sumer, B. M., Fredsoe, J., Lamberti, A., Zanuttigh, B., Dixen, M., Gislason, K., Di Penta, A. F. (2005). *Local scour at roundhead and along the trunk of low crested structures*. Coastal Engineering 52, 995-1025.
- Taveira-Pinto, F. (2014) – *O Fenómeno da Erosão Costeira*. Conferências sobre o Litoral Português, Ordem dos Engenheiros, Lisboa.
- Veloso-Gomes, F., Barroco, A., Pereira, A. R., Reis, C. S., Calado, H., Ferreira, J. G., Freitas, M. C., Biscoito, M. (2007) – *Bases para a Estratégia de Gestão integrada da Zona Costeira Nacional*. 2as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Porto.
- Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R., Mansard E. P. D., Gomez-Pina, G. (1992) – *A universal analysis for the stability of both lowcrested and submerged breakwaters*. Proc. of the Twenty-Third International Conference, Veneza, Italia, 1680-1692.
- Wolters, G. (2007). *Guidelines for Physical Model Testing of Breakwaters*. Rubble Mound breakwaters. Hydralab III – Report, May.
- <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx> [Consult. 4 Setembro 2014].
- Zeidler, K., Pilarczyk, W. (1996) - *Offshore Breakwaters and Shore Evolution Control*. Taylor & Francis, London.

ANEXOS

Anexo A: Condições de agitação obtidas nas sondas

Grupo de ensaio	Nº de ensaio	Cond. de agitaç.	Dur. [min]	Condições teóricas		Sonda 1		Sonda 2		Sonda 3		Sonda 4	
				Tp [s]	Hs [cm]	Tp [s]	Hs [cm]	Tp [s]	Hs [cm]	Tp [s]	Hs [cm]	Tp [s]	Hs [cm]
1	1	C1	24	1,34	5,00	1,31	5,55	1,26	5,35	1,34	5,30	1,34	5,10
	2		24	1,34	5,00	1,34	5,55	1,18	5,40	1,34	5,35	1,34	5,15
	3		24	1,34	5,00	1,31	5,60	1,26	5,35	1,34	5,30	1,34	5,10
	4		24	1,34	5,00	1,29	5,55	1,26	5,35	1,26	5,30	1,34	5,05
	5		24	1,34	5,00	1,34	5,55	1,26	5,35	1,34	5,30	1,34	5,05
	6		24	1,34	5,00	1,34	5,65	1,34	5,45	1,34	5,40	1,34	5,15
	7	C2	24	2,24	7,50	2,27	6,40	2,27	8,45	2,27	8,90	2,27	9,15
	8		24	2,24	7,50	2,27	7,70	2,27	8,45	2,27	8,90	2,27	9,15
	9		96	2,24	7,50	2,23	7,75	2,25	8,55	2,25	9,00	2,27	9,30
	10	C3	48	1,34	2,50	1,10	2,55	1,18	2,45	1,18	2,40	1,18	3,95
	11	C4	48	1,34	5,00	1,27	5,50	1,18	5,50	1,18	5,25	1,34	5,10
	12	C5a	48	2,68	2,50	2,69	2,70	2,67	3,20	2,67	3,20	2,68	3,30
	13	C6	48	2,68	5,00	2,69	4,95	2,69	5,75	2,58	6,10	2,58	6,30
	14	C7	48	1,79	15,00	1,84	13,50	1,84	12,80	1,84	12,80	1,84	12,25
	15	C8	48	2,24	5,00	2,18	5,05	1,77	5,50	1,77	5,65	2,08	5,65
	16	C5b	180	2,68	2,50	2,64	2,70	2,45	3,80	2,55	3,20	2,55	2,35
2	17	C2	48	2,24	7,50	2,18	7,35	2,18	8,25	2,08	8,30	2,08	8,50
	18		96	2,24	7,50	2,18	7,85	2,18	8,40	2,18	8,20	2,18	8,20
	19	C3	48	1,34	2,50	1,35	2,25	1,35	2,20	1,35	2,15	1,35	2,10
	20	C8a	48	2,24	5,00	2,13	5,05	2,08	5,55	2,09	5,60	2,09	5,70
	21	C5	48	2,68	2,50	2,84	2,30	2,84	2,60	2,84	2,60	2,84	2,70
	22	C6	48	2,68	5,00	2,84	3,90	2,84	4,15	2,84	4,20	2,84	4,30
	23	C7	24	1,79	15,00	1,78	15,40	1,78	15,50	1,78	14,35	1,78	13,60
	24		24	1,79	15,00	1,78	15,55	1,78	15,60	1,78	14,50	1,78	13,80
	25	C8b	48	2,24	5,00	2,21	4,80	2,21	5,05	2,21	5,05	2,21	4,85
3	26	C1	144	1,34	5,00	1,29	5,35	1,27	5,40	1,38	5,25	-	-
	27	C2	144	2,24	7,50	2,25	8,10	2,25	7,70	2,25	7,80	2,25	8,00
	28	C9	48	1,79	12,50	1,80	12,60	-	-	1,79	11,80	1,79	11,75

Anexo B: Código do Programa MATLAB “Prog_zmin”

Anexo B1: Determinação da cota mínima (zmin) de cada reconstrução (“ternosL”) e respectivas coordenadas x e y.

```
clear all
close all
% Grupo 1 (Baixa-mar): de ternosL1 a ternosL14
% Grupo 2 (Preia-mar): de ternosL15 a ternosL25
% Grupo 3 (Baixa-mar com gravilha): de ternosL26 a ternosL31

% Nome do ficheiro
file='ternosL'
ext='.dat'

% Área de trabalho (Domínio)
tx=0.27:0.005:0.60;          %0.31:0.005:0.6 para gráficos
ty=0.09:0.005:0.30;          %0.09:0.005:0.26 para gráficos
[xi,yi]=meshgrid(tx,ty);

% Correções do referencial em x e y
corx=[0;-0.01987;-0.02054;-0.01143;-0.01993;-0.014;-0.019;-0.013;-
0.017;-0.018;-0.0196;-0.022;-0.021;-
0.01;0;+0.00046;+0.03883;+0.021;+0.0255;+0.03853;+0.03711;+0.041;-
0.01527;-0.00564;-0.00063;0;-0.00759;-0.005;-0.01;-0.008;-0.011];
cory=[0;-0.0151;-0.02528;-0.02092;-0.01868;-0.016;-0.035;-0.009;-0.035;-
0.033;-0.033;-0.025;-0.020;-0.029;0;-
0.0263;+0.03344;+0.022;+0.02396;+0.02167;+0.02368;+0.031;-
0.02376;+0.00278;-0.00551;0;-0.00983;-0.007;-0.028;-0.028;-0.028];

% Ciclo de dados para determinação de zmin
for i=1:31
    filein=[file,int2str(int8(i)),ext]
    A=load(filein);

    % Determina a matriz zi com x e y corrigidos
    cx=corx(i,1);
    cy=cory(i,1);
    x=A(:,1)+cx;
    y=A(:,2)+cy;
    z=A(:,3);
    zi=griddata(x,y,z,xi,yi);

    % (x,y,zi min) de cada ternosL
    zmin(i)=min(min(zi))          %Determina zmin de cada ternosL
    [ax,ay]=find(zi==zmin(i));
    xmin(i)=x(ax,ay)              %Determina a coordenada x de cada zmin
    ymin(i)=y(ax,ay)              %Determina a coordenada y de cada zmin
end

% Gráficos de z: superfícies tridimensionais
figure(1)
mesh(xi,yi,zi)
colormap(jet(18));colorbar;caxis([-0.24 -0.1]) %[-0.44 -0.3] para PM
xlabel('x [m]')
ylabel('y [m]')
zlabel('z [m]')
c=colorbar;
ylabel(c, 'z [m]')
zlim([-0.17 -0.1]) %alterar zlim para cada caso
```

Anexo B2: Determinação das diferenças entre as reconstruções correspondentes ao fim de cada condição de agitação com a reconstrução correspondente à situação inicial do fundo

```
clear all
close all
% Grupo 1 (Baixa-mar): de ternosL1 a ternosL14
% Grupo 2 (Preia-mar): de ternosL15 a ternosL25
% Grupo 3 (Baixa-mar com gravilha): de ternosL26 a ternosL31

% ternosL1 simulado como ternosL15, mas somando 0.175 em z

% Diferenças de "ternosL" do Grupo 1: 4-1; 7-1; 8-1; 10-1; 11-1; 12-1;
14-1.
% Diferenças de "ternosL" do Grupo 2: 17-15; 19-15; 20-15; 21-15; 23-15;
25-15.
% Diferenças de "ternosL" do Grupo 3: 29-27; 31-27.

% Nome do ficheiro
file='ternosL'
ext='.dat'

% Área de trabalho (domínio)
tx=0.34:0.005:0.60;
ty=0.09:0.005:0.26;
[xi,yi]=meshgrid(tx,ty);

% Correções do referencial em x e y
corx=[0;-0.01987;-0.02054;-0.01143;-0.01993;-0.014;-0.019;-0.013;-
0.017;-0.018;-0.0196;-0.022;-0.021;-
0.01;0;+0.00046;+0.03883;+0.021;+0.0255;+0.03853;+0.03711;+0.041;-
0.01527;-0.00564;-0.00063;0;-0.00759;-0.005;-0.01;-0.008;-0.011];
cory=[0;-0.0151;-0.02528;-0.02092;-0.01868;-0.016;-0.035;-0.009;-0.035;-
0.033;-0.033;-0.025;-0.020;-0.029;0;-
0.0263;+0.03344;+0.022;+0.02396;+0.02167;+0.02368;+0.031;-
0.02376;+0.00278;-0.00551;0;-0.00983;-0.007;-0.028;-0.028;-0.028];

% Ciclos de dados para determinação de zi inicial e zi
for i=15
    filein=[file,int2str(int8(i)),ext]
    A=load(filein);
    % Determina a matriz zi com x e y corrigidos
    cx=corx(i,1);
    cy=cory(i,1);
    x=A(:,1)+cx;
    y=A(:,2)+cy;
    z=A(:,3)+0.175;
    zi=griddata(x,y,z,xi,yi);
end

for i=4
    filein=[file,int2str(int8(i)),ext]
    A=load(filein);
    % Determina a matriz zi com x e y corrigidos
    cx=corx(i,1);
    cy=cory(i,1);
    xa=A(:,1)+cx;
    ya=A(:,2)+cy;
    za=A(:,3);
    wi=griddata(xa,ya,za,xi,yi);
end
```

```

%Diferença entre zi e zi inicial de cada grupo
di=wi-zi

% Gráficos de z
figure(1)
isolevels=linspace(-0.1, 0.1, 22);
contourf(xi, yi, di, isolevels)
colormap(jet(22));colorbar;caxis([-0.1 0.1])
xlabel('x [m]')
ylabel('y [m]')
zlabel('z [m]')
c=colorbar;
ylabel(c, 'z [m]')

```


Anexo C: Valores de cota máxima do fundo atingidos em cada reconstrução (fotogrametria)

Grupo de ensaio	Número da reconstrução "ternosL"	Duração [min]	Profundidade h [cm]	Condição de agitação	Tp [s]	Hs [cm]	zmin [cm]
1	1	-	-	-	-	-	-
	2	24	37	C2	2,24	7,5	-22,46
	3	24	37	C2	2,24	7,5	-22,83
	4	96	37	C2	2,24	7,5	-21,91
	5	48	37	C3	1,34	2,5	-23,39
	6	-	37	C3	-	-	-23,39
	7	48	37	C4	1,34	5	-24,07
	8	48	37	C5	2,68	2,5	-23,31
	9	-	37	C5	-	-	-23,41
	10	48	37	C6	2,68	5	-23,45
	11	48	37	C7	1,79	15	-23,19
	12	48	37	C8	2,24	5	-21,58
	13	-	37	C8	-	-	-21,58
	14	180	37	C5	2,68	2,5	-21,70
2	15	-	54,5	C5	-	-	-36,31
	16	48	54,5	C2	2,24	7,5	-33,88
	17	96	54,5	C2	2,24	7,5	-36,85
	18	-	54,5	C2	-	-	-36,85
	19	48	54,5	C3	1,34	2,5	-36,47
	20	48	54,5	C8	2,24	5	-35,54
	21	48	54,5	C5	2,68	2,5	-35,99
	22	-	54,5	C5	-	-	-35,99
	23	48	54,5	C6	2,68	5	-38,18
	24	-	-	-	-	-	-
	25	24	54,5	C7	1,79	15	-41,50
3	26	-	-	-	-	-	-
	27	144	37	C1	1,34	5	-16,00
	28	-	37	C1	-	-	-16,00
	29	144	37	C2	2,24	7,5	-15,00
	30	-	37	C2	-	-	-15,00
	31	48	37	C9	1,79	12,5	-15,00

Anexo D: Valores de cota máxima do fundo atingidos em cada reconstrução (manual)

Grupo de ensaio	Número da reconstrução "ternosL"	Duração [min]	Profundidade h [cm]	Condição de agitação	Tp [s]	Hs [cm]	zmin (manual) [cm]
1	1						
	2	24	37	C2	2,24	7,5	-
	3	24	37	C2	2,24	7,5	-
	4	96	37	C2	2,24	7,5	-22
	5	48	37	C3	1,34	2,5	-22,3
	6	-	37	C3	-	-	-22,3
	7	48	37	C4	1,34	5	-22,4
	8	48	37	C5	2,68	2,5	-22,5
	9	-	37	C5	-	-	-22,2
	10	48	37	C6	2,68	5	-23,1
	11	48	37	C7	1,79	15	-21,3
	12	48	37	C8	2,24	5	-20
	13	-	37	C8	-	-	-20
	14	180	37	C5	2,68	2,5	-20
2	15	-	54,5	C5	-	-	-
	16	48	54,5	C2	2,24	7,5	-
	17	96	54,5	C2	2,24	7,5	-34,8
	18	-	54,5	C2	-	-	-35,4
	19	48	54,5	C3	1,34	2,5	-34,9
	20	48	54,5	C8	2,24	5	-34,4
	21	48	54,5	C5	2,68	2,5	-35,6
	22	-	54,5	C5	-	-	-35,6
	23	48	54,5	C6	2,68	5	-34
	24						
	25	24	54,5	C7	1,79	15	-38,4
3	26						
	27	144	37	C1	1,34	5	-15,4
	28	-	37	C1	-	-	-15,4
	29	144	37	C2	2,24	7,5	-14,8
	30	-	37	C2	-	-	-14,2
	31	48	37	C9	1,79	12,5	-14,8

Anexo E: Valores de cota dos blocos atingidos em cada reconstrução (fotogrametria)

Grupo de ensaios	Número da reconstrução "ternosL"	z fotogrametria [cm]							
		D		C		B		A	
		Barlam.	Sotam.	Barlam.	Sotam.	Barlam.	Sotam.	Barlam.	Sotam.
1	1								
	2	-3,4	-3,6	-3,5	-3,6	-4,5	-4,3	-3,7	-3,1
	3	-4,3	-4,5	-4,3	-4,5	-4,8	-4,1	-4,4	-3,7
	4	-3,8	-4,6	-4,3	-5,1	-4,4	-5,0	-4,5	-4,5
	5	-5,6	-6,9	-5,6	-6,9	-5,7	-6,5	-5,0	-5,7
	6	-5,0	-6,9	-5,4	-6,9	-5,9	-6,4	-5,4	-6,1
	7	-7,2	-8,4	-6,6	-7,9	-7,0	-7,7	-5,9	-5,9
	8	-7,4	-8,7	-7,7	-8,5	-7,4	-7,9	-5,9	-5,9
	9	-7,0	-8,3	-7,3	-7,5	-7,1	-7,4	-5,8	-6,3
	10	-7,5	-8,3	-7,2	-7,9	-6,5	-7,5	-5,4	-6,3
	11	-7,0	-8,4	-7,6	-7,9	-6,5	-7,1	-6,1	-6,2
	12	-6,3	-7,3	-6,7	-7,5	-5,6	-7,5	-5,4	-5,7
	13	-5,2	-6,5	-6,5	-7,3	-6,3	-8,2	-5,2	-7,0
	14	-5,9	-7,2	-7,2	-7,9	-6,9	-8,7	-6,2	-7,4
2	15	-21,0	-19,8	-20,9	-20,2	-20,9	-20,6	-21,4	-20,7
	16	-21,1	-20,4	-21,0	-20,3	-20,9	-20,7	-21,5	-20,8
	17	-21,2	-20,0	-21,0	-20,8	-21,5	-20,8	-21,5	-20,8
	18	-22,1	-22,0	-21,7	-21,2	-21,1	-21,0	-20,5	-20,4
	19	-20,6	-20,1	-20,6	-20,1	-20,4	-19,9	-20,2	-19,7
	20	-20,4	-19,9	-20,5	-20,0	-20,3	-19,8	-20,1	-20,1
	21	-20,4	-19,9	-20,5	-20,0	-20,3	-20,2	-20,1	-20,1
	22	-21,4	-20,6	-21,0	-20,2	-20,3	-19,5	-19,7	-18,9
	23	-23,1	-22,3	-22,7	-21,9	-22,0	-21,2	-21,4	-20,6
	24								
	25	-22,6	-22,8	-22,8	-23,8	-22,1	-22,3	-21,6	-21,3
3	26								
	27	-2,5	-3,8	-2,9	-3,7	-3,8	-3,7	-3,8	-3,2
	28	-5,3	-3,8	-4,4	-3,3	-4,4	-2,9	-4,0	-3,1
	29	-5,3	-3,9	-4,4	-3,4	-4,1	-3,0	-4,1	-2,6
	30	-3,1	-2,4	-3,6	-2,8	-3,6	-2,8	-3,6	-2,8
	31	-2,6	-2,2	-3,0	-2,1	-3,0	-2,5	-3,4	-3,0

Anexo F: Valores de cota dos blocos atingidos em cada reconstrução (manual)

Grupo de ensaios	Número da reconstrução "ternosL"	z manual [cm]							
		D		C		B		A	
		Barlam.	Sotam.	Barlam.	Sotam.	Barlam.	Sotam.	Barlam.	Sotam.
1	1								
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-5,93	-7,20	-6,13	-6,87	-5,78	-6,60	-5,23	-5,56
	5	-6,03	-7,10	-6,03	-6,77	-5,78	-6,70	-5,13	-5,46
	6	-6,03	-7,10	-6,03	-6,77	-5,78	-6,70	-5,13	-5,46
	7	-6,13	-7,20	-6,13	-6,87	-5,88	-6,70	-5,13	-5,56
	8	-6,13	-7,20	-6,13	-6,87	-5,78	-6,70	-5,13	-5,46
	9	-6,13	-7,20	-6,13	-6,87	-5,78	-6,70	-5,13	-5,46
	10	-6,13	-7,20	-6,63	-7,37	-6,08	-7,10	-5,13	-5,86
	11	-6,13	-7,50	-6,63	-7,57	-6,18	-7,30	-5,13	-5,96
	12	-6,13	-7,30	-6,73	-7,47	-6,28	-7,30	-5,13	-5,86
	13	-6,13	-7,30	-6,73	-7,47	-6,28	-7,30	-5,13	-5,86
	14	-6,23	-7,40	-6,73	-7,47	-6,28	-7,30	-5,23	-5,76
2	15	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	-	-	-	-	-	-	-	-
	17	-21,76	-20,97	-21,76	-21,36	-21,16	-20,37	-20,70	-20,24
	18	-21,76	-20,97	-21,76	-21,36	-21,16	-20,37	-20,70	-20,24
	19	21,76	-20,97	-21,66	-21,36	-21,16	-20,27	-20,80	-20,24
	20	-21,76	-20,97	-21,66	-21,36	-21,16	-20,27	-20,80	-20,24
	21	-21,66	-20,97	-21,66	-21,36	-21,16	-20,27	-20,80	-20,24
	22	-21,66	-20,97	-21,66	-21,36	-21,16	-20,27	-20,80	-20,24
	23	21,76	-20,97	-21,66	-21,36	-21,16	-20,27	-20,80	-20,24
	24								
	25	-22,06	-22,27	-23,26	-24,06	-23,46	-23,07	-21,70	-21,64
3	26								
	27	-3,48	-3,22	-3,45	-3,10	-3,62	-2,78	-3,75	-2,85
	28	-3,48	-3,22	-3,45	-3,10	-3,62	-2,78	-3,75	-2,85
	29	-3,48	-3,22	-3,45	-3,10	-3,72	-2,88	-3,75	-2,95
	30	-3,48	-3,22	-3,45	-3,10	-3,72	-2,88	-3,75	-2,95
	31	-3,48	-3,32	-3,35	-3,10	-3,62	-3,78	-3,75	-2,95

Anexo G: Curvas de nível do fundo correspondentes à diferença entre as condições de agitação C2, C3, C4, C5a, C6, C7, C8 e C5b e o fundo inicial do Grupo 1.

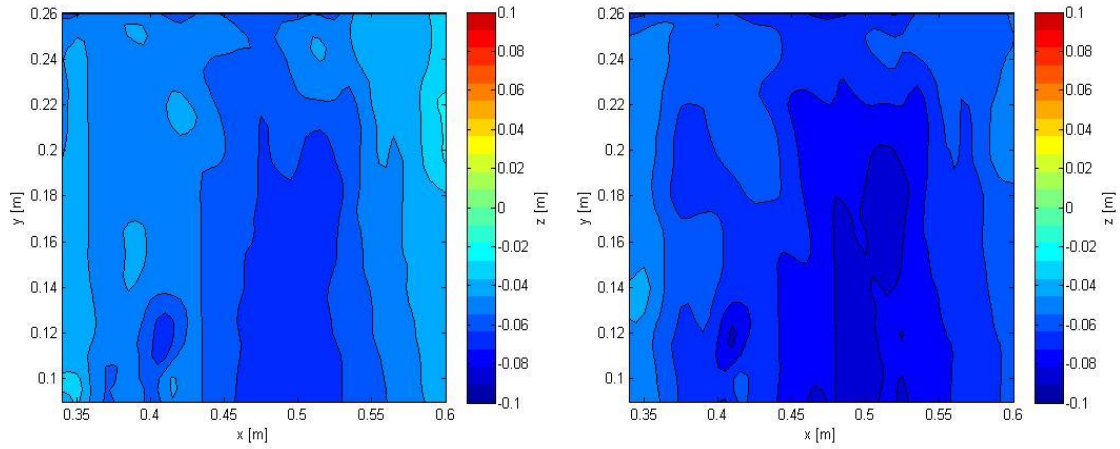


Figura G.1: Diferença entre C2 e o fundo inicial (esquerda) e diferença entre C3 e o fundo inicial (direita)

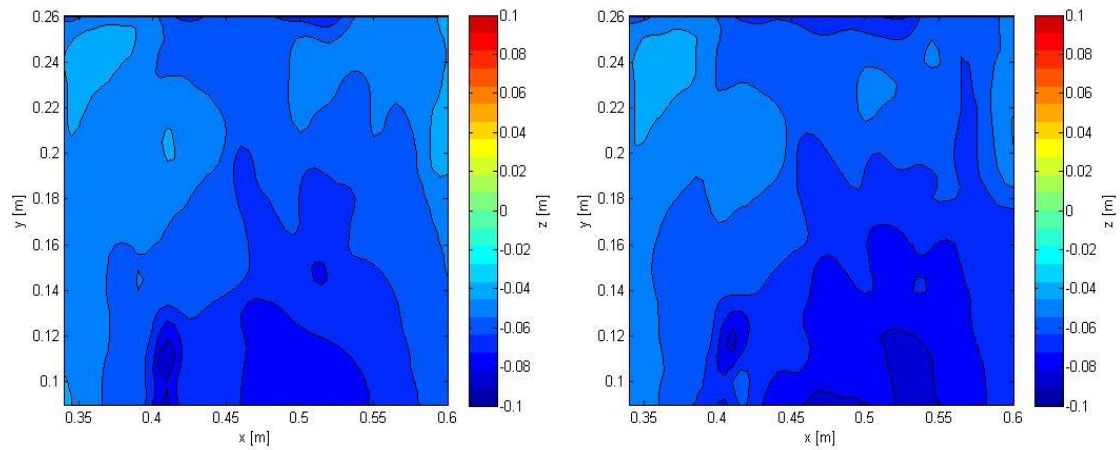


Figura G.2: Diferença entre C4 e o fundo inicial (esquerda) e diferença entre C5 e o fundo inicial (direita)

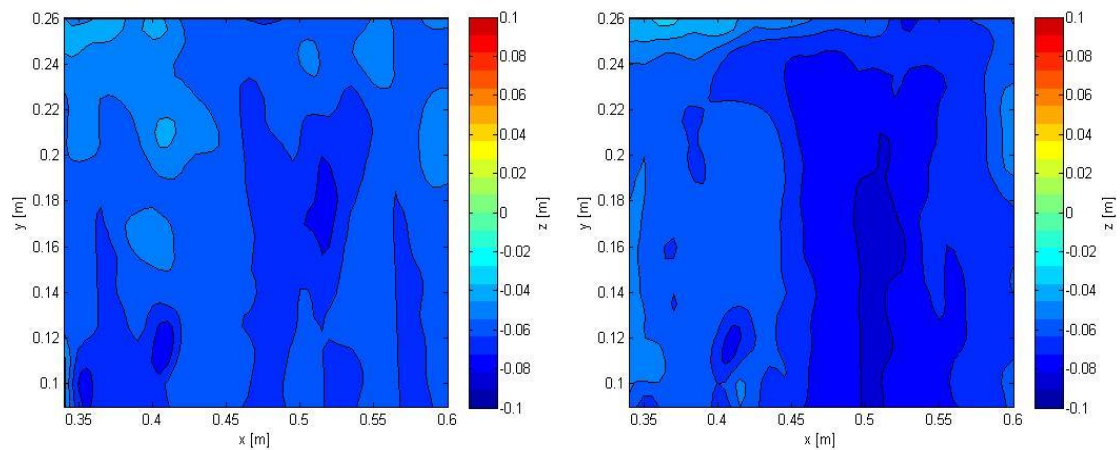


Figura G.3: Diferença entre C6 e o fundo inicial (esquerda) e diferença entre C7 e o fundo inicial (direita)

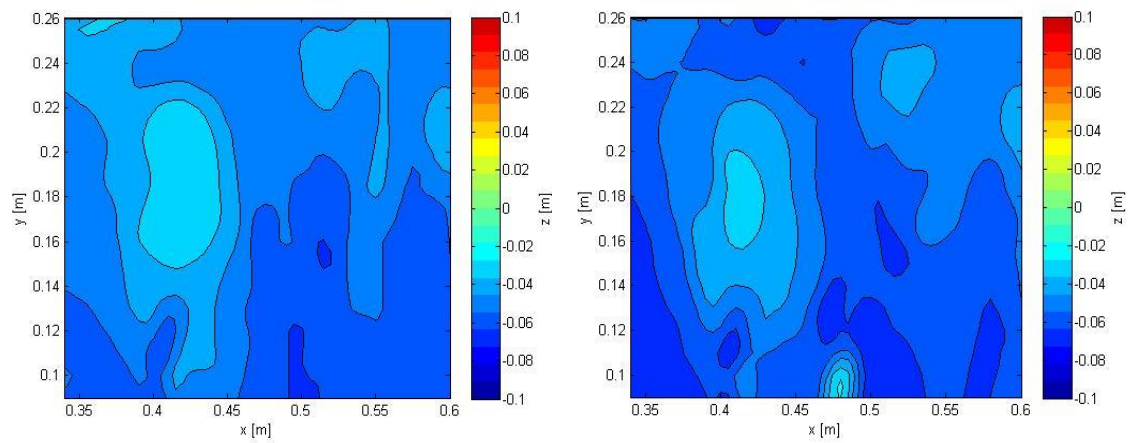


Figura G.4: Diferença entre C8 e o fundo inicial (esquerda) e diferença entre C5b e o fundo inicial (direita)

Anexo H: Curvas de nível do fundo correspondentes às diferenças as condições de agitação C2, C3, C8a, C5, C6, C7 e C8b e o fundo inicial do Grupo 2.

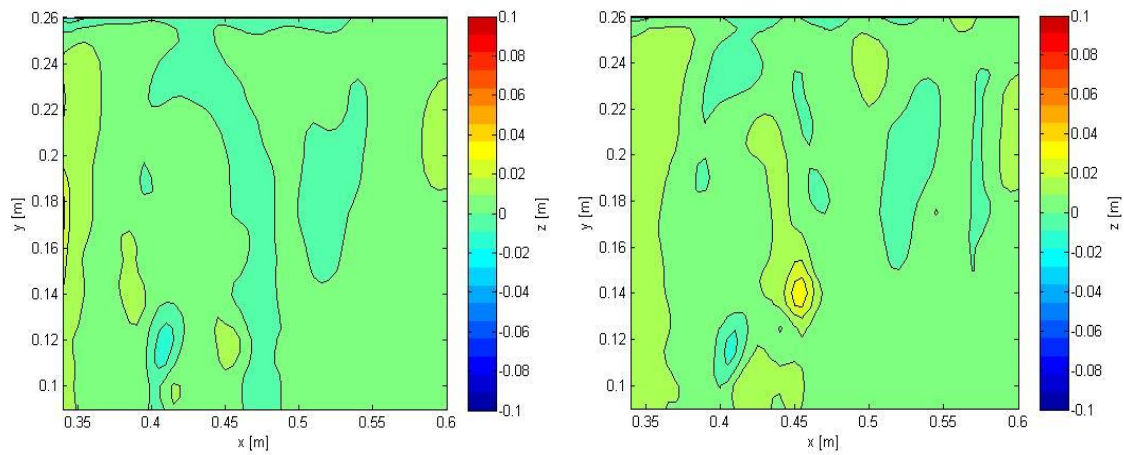


Figura H.1: Diferença entre C2 e o fundo inicial (esquerda) e diferença entre C3 e o fundo inicial (direita)

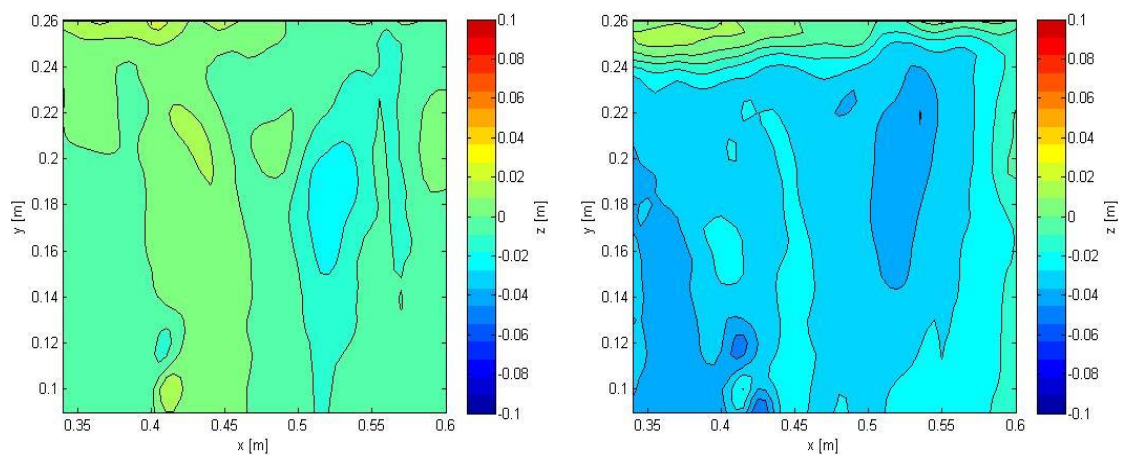


Figura H.2: Diferença entre C8a e o fundo inicial (esquerda) e diferença entre C5 e o fundo inicial (direita)

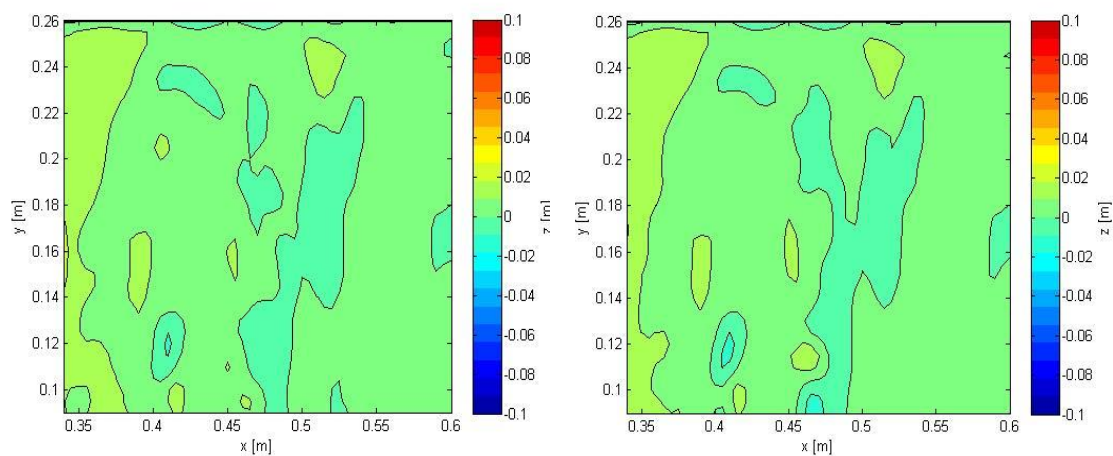


Figura H.3: Diferença entre C6 e o fundo inicial (esquerda) e diferença entre C7 e o fundo inicial (direita)

Anexo I: Curvas de nível do fundo correspondentes às diferenças as condições de agitação C2 e C9 e o fundo após a condição C1 do Grupo 3.

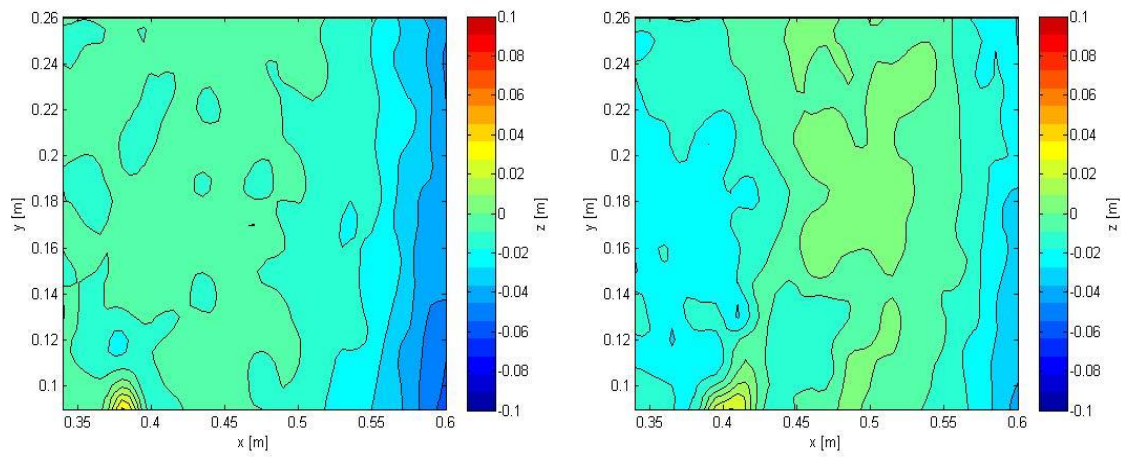


Figura I.1: Diferença entre C2 e o fundo inicial (esquerda) e diferença entre C9 e o fundo inicial (direita)

Anexo J: Blocos correspondentes ao início e fim de cada grupo de ensaios

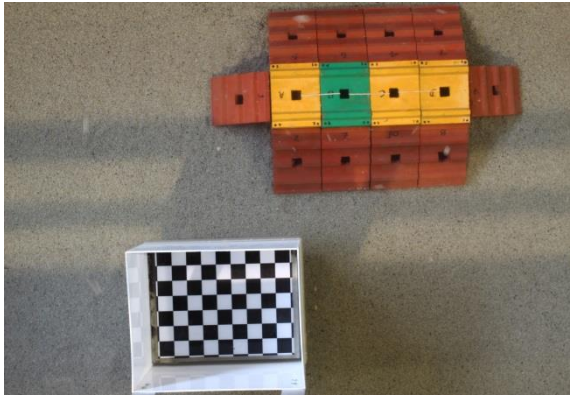


Figura J.1: Posição inicial (esquerda) e final (direita) dos blocos no grupo 1

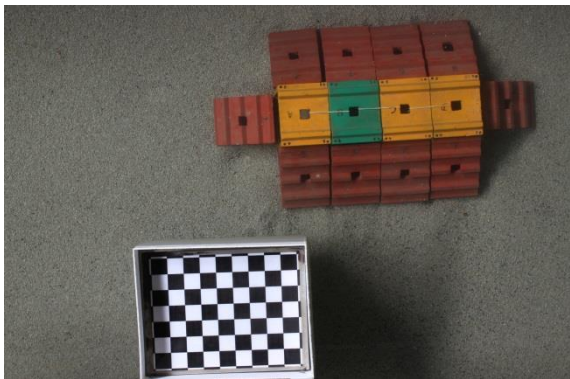


Figura J.2: Posição inicial (esquerda) e final (direita) dos blocos no grupo 2

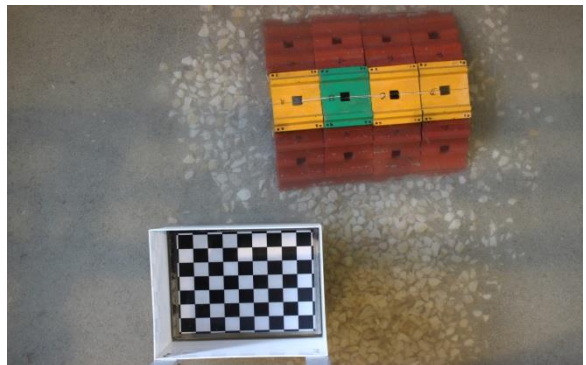
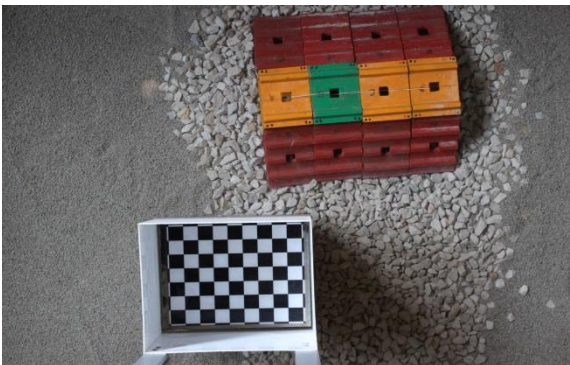


Figura J.3: Posição inicial (esquerda) e final (direita) dos blocos no grupo 3